

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. Ondřej Kolek

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

Analyzátor elektrického výkonu na bázi
DEWE-561
Electrical Power Analyzer based on
DEWE-561

2017

Bc. Ondřej Kolek

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Kolek**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Analyzátor elektrického výkonu na bázi DEWE-561**
Electrical Power Analyzer based on DEWE-561

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium problematiky měření elektrického výkonu v digitalizované formě.
2. Studium hardwarové platformy DEWE-561.
3. Realizace analyzátoru P, Q, S a PF pro různá 3f zapojení.
4. Realizace kontroly běhu aplikace čtením status proměnné.
5. Kalibrace analyzátoru a implementace korekčních tabulek.
6. Ověření analyzátoru při praktickém měření a vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9..
- [2] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I*. Sylaby do předmětu Virtuální instrumentace I. Ostrava 2012. 264 s.
- [3] DEWETRON. *DEWE-561 Technical Reference Manual*. Graz-Grambach Austria:DEWETRON Elektronische Messgeraete Ges.m.b.H, 2010. Dostupné z: http://dewamerica.com/resources/Manuals/DEWE-561-PNA_manual.pdf.
- [4] DEWETRON. *Power Network Analysis. DEWE - PNA*. Graz-Grambach Austria:DEWETRON Elektronische Messgeraete Ges.m.b.H. Dostupné z: http://www.systemtech.se/fileadmin/resources/datasheets/dewetron/2011/dewetron_power-network-analysis_apps_e.pdf.
- [5] KOVAL, Ludvík. *Elektrická měření - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 147 s. Dostupné také z: <http://lms.vsb.cz/course/view.php?id=31362>.
-

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ludvík Koval, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Kolek

Ondřej Kolek

V Ostravě, dne 28. dubna 2017

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ludvíkovi Kovalovi, Ph.D. za odborné vedení a podporující přístup. Poděkování patří také mým rodičům za podporu během studia.

Abstrakt

DEWE-561 je třífázový analyzátor kvality napájení a záznamník výkonu. Je však uživatelsky velice nepříjemný, před započítím měření je nutné složité nastavování přístroje. Uživatel musí pečlivě prostudovat návod, aby byl schopen nastavit všechny měřicí módy, než je schopen spustit měření. Cílem diplomové práce je vytvoření aplikace analyzátoru výkonů a účinníku v grafickém programovacím prostředí LabVIEW na platformě DEWE-561, který by byl jednoduše ovladatelný a jeho použití uživatelsky snadné. Pro kontrolu běhu aplikace je využit program pro mobilní telefony a tablety s názvem Data Dashboard. Ten uživatelům umožňuje přístup k naměřeným hodnotám například pomocí komunikačního rozhraní Wi-Fi. Poslední kapitoly se zabývají kalibrací analyzátoru, implementací korekčních tabulek a vyhodnocením výsledků.

Klíčová slova

LabVIEW, DEWE-561, elektrický výkon, Data Dashboard, PCI-6250, VISA

Abstract

DEWE-561 is a three-phase power quality analyzer and the recorder of electric power. However, it is very user-unfriendly. Before setting up the measurement, complex setup is required. The user must carefully examine the instruction to be able to set all measurement modes before he can start the measurement. The aim of the thesis is to create an application of analyzer power and power factor in LabVIEW on platform DEWE-561, which is easy to use. To check the runtime is used program for mobile phones and tablets called Data Dashboard. That allows users to access the measured values, for example, using the Wi-Fi communication interface. The last chapters deal with calibration of the analyzer, correction tables implementation and evaluation of results.

Key words

LabVIEW, DEWE-561, Electric Power, Data Dashboard, PCI-6250, VISA

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam ilustrací	9
Seznam tabulek	10
1 Úvod	11
2 Studium problematiky měření elektrického výkonu v digitalizované formě.	12
2.1 Trojfázová soustava.....	14
2.2 Třífázový činný výkon	15
2.2.1 Obecná napájecí soustava, obecná zátěž a čtyřvodičová síť:	16
2.2.2 Souměrná napájecí soustava, souměrná zátěž, čtyřvodičová síť:.....	16
2.2.3 Obecná napájecí soustava, obecná zátěž a třívodičová síť:.....	17
2.2.4 Aronovo zapojení	17
3 Studium hardwarové platformy DEWE-561	19
3.1 Proudové kleště PNA-CLAMP-10	21
3.2 Měřicí karta NI PCI-6250	22
3.3 Převod analogového signálu na digitální.....	24
3.4 AD převodník s postupnou aproximací.....	25
3.5 Přepínání rozsahů	25
4 Realizace analyzátoru P, Q, S a PF pro různá 3f zapojení.	28
4.1 VISA	28
4.2 Přepínání rozsahů v programu.....	31
4.3 Vyčítání dat v programu.....	32
4.4 Konfigurace.....	33
4.5 Osciloskop.....	34
4.6 P, Q, S, Cos φ	35
4.7 Výpočet výkonů v jednotlivých zapojeních	36
5 Realizace kontroly běhu aplikace čtením status proměnné.	38
5.1 Data Dashboard for LabVIEW.....	38
5.2 Tvorba aplikace	39
6 Kalibrace analyzátoru a implementace korekčních tabulek	41
7 Ověření analyzátoru při praktickém měření a vyhodnocení výsledků	47
8 Závěr	51
Literatura	52
Seznam příloh.....	54

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	Střídavý proud
AD	Analogově digitální převodník
AO	Analogový výstup
API	Rozhraní pro programování aplikací
$\cos \varphi$	Účinník (-)
cRIO	Compact Reconfigurable Input Output, CompactRIO
DA	Digitálně analogový převodník
DAQ	Data Acquisition, systém pro měření a sběr dat
DC	Stejnoseměrný proud
DIN	Digitální vstup
DOUT	Digitální výstup
DSP	Digitální signální procesor
dt	Vzorkovací interval
FFT	Rychlá Fourierova transformace
GPS	Globální polohový systém
I/O	Vstup/ výstup
iOS	Mobilní operační systém
L1	Fáze 1 elektrické sítě
L2	Fáze 2 elektrické sítě
L3	Fáze 3 elektrické sítě
LSB	Nejméně významný bit
MAX	Measurement & Automation Explorer
MSB	Nejvýznamnější bit
N	Nulový vodič elektrické sítě
NI	National Instruments
OS	Operační systém
P	Činný výkon (W)
p	Okamžitý výkon (W)
PC	Personal computer
PCI	Počítačová sběrnice
PF	Power factor, účinník
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
Q	Jalový výkon (var)
R	Elektrický odpor (Ω)
RS-232	Komunikační rozhraní
S	Zdánlivý výkon (VA)
T	Perioda (s)
TFT	Technologie LCD displeje
Tp	Třída přesnosti
TTL	Tranzistorově tranzistorová logika
U	Elektrické napětí (V)
U_m	Maximální hodnota napětí (V)
U_{REF}	Referenční napětí (V)
VI	Virtuální přístroj
VXI	Komunikační sběrnice
φ	Fázový posun (rad)
ω	Úhlová rychlost (rad/s)

Seznam ilustrací

Obr. 1. Průběh napětí, proudu a výkonu pro ohmickou zátěž [2].....	12
Obr. 2. Trojúhelník výkonů [1]	13
Obr. 3. Fázorový diagram napětí [3] Obr. 4. Časový průběh napětí jednotlivých fází [4]	14
Obr. 5. Měření činného výkonu – čtyřvodičová síť [1]	16
Obr. 6. Měření činného výkonu – souměrná napájecí soustava, souměrná zátěž [1]	16
Obr. 7. Měření činného výkonu – třívodičová síť [1].....	17
Obr. 8. Aronovo zapojení pro měření činného výkonu [1].....	18
Obr. 9. Analyzátor sítě DEWE-561 [7]	19
Obr. 10. Proudové a napěťové vstupy [5]	20
Obr. 11. Proudové kleště MN 71 a typ konektoru [8], [9]	21
Obr. 12. Testovací panel v NI MAX.....	22
Obr. 13. Měřicí karta NI PCI-6250 [10].....	22
Obr. 14. Princip kvantování [13].....	24
Obr. 15. AD převodník s postupnou aproximací [12].....	25
Obr. 16. Vzorkovaný signál Obr. 17. Aliasing vzniklý nedostatečnou.....	27
Obr. 18. Ukázka Visa architektury [15].....	28
Obr. 19. Visa bloky v LabVIEW	29
Obr. 20. VISA Configure Serial Port	30
Obr. 21. Funkce VISA Write	30
Obr. 22. Funkce VISA Read	30
Obr. 23. Čelní panel a blokový diagram pro přepínání rozsahů.....	31
Obr. 24. Vyčítání dat v programu	32
Obr. 25. Okno konfigurace	33
Obr. 26. Okno osciloskopu	34
Obr. 27. Okno měřených výkonů a účinníku	35
Obr. 28. Výpočet činného a zdánlivého výkonu v jednofázovém zapojení.....	36
Obr. 29. Výpočet zdánlivého a činného výkonu v trojfázovém zapojení	36
Obr. 30. Výpočet celkových výkonů v Aronově zapojení	37
Obr. 31. Logo Data Dashboard for LabVIEW [17].....	38
Obr. 32. Projekt se sdílenými proměnnými pro činný výkon a blokový diagram.....	39
Obr. 33. Připojení sdílených proměnných na lokální síť	39
Obr. 34. Způsob propojení indikátoru se sdílenou proměnnou a nabídka indikátorů	40
Obr. 35. Vytvořené uživatelské rozhraní.....	40
Obr. 36. OMICRON CMC 256plus [18].....	41
Obr. 37. Část obrazovky software kalibrátoru Omicron- Test Universe	42
Obr. 38. Graf kalibračních hodnot pro zdánlivý výkon v jednofázovém zapojení.....	43
Obr. 39. Odchylka činného výkonu před kalibrací pro posun 0°, 30°, 60°	45
Obr. 40. Implementace kalibračních hodnot do programu pro posun 0°	46
Obr. 41. Implementace kalibračních hodnot do programu pro posun 60°	46

Seznam tabulek

Tab. 1. Parametry DEWE-561 [6].....	20
Tab. 2. Parametry proudových kleští PNA-CLAMP-10 [8]	21
Tab. 3. Přesnost a fázový posun kleští PNA-CLAMP-10.....	21
Tab. 4. Parametry karty NI PCI-6250 [11].....	23
Tab. 5. Volba napěťového a proudového rozsahu	26
Tab. 6. Parametry kalibrátoru OMICRON CMC 256plus [19]	41
Tab. 7. Zdánlivý výkon před kalibrací Tab. 8. Zdánlivý výkon po kalibraci	43
Tab. 9. Činný výkon před kalibrací	44
Tab. 10. Činný výkon po kalibraci.....	44
Tab. 11. Jednofázové zapojení	47
Tab. 12. Trojfázové zapojení	47
Tab. 13. Aronovo zapojení	47
Tab. 14. Měření v jednofázovém zapojení po kalibraci	48
Tab. 15. Měření v trojfázovém zapojení po kalibraci.....	49
Tab. 16. Měření v Aronově zapojení po kalibraci.....	50

1 Úvod

DEWE-561 je třífázový analyzátor kvality napájení a záznamník výkonů, který velice podrobně analyzuje nejdůležitější parametry systému elektrického napájení. Všechny elektrické veličiny je možné zobrazit jak v číselné, tak grafické podobě s průběhy a fázory. Umožňuje zobrazování harmonických spekter, statistik, analýzu chyb a mnoho dalších parametrů. Jedná se o klasickou platformu a to počítač, který spolupracuje s měřicí kartou. Ovládání je možné pomocí myši, klávesnice, případně dotykové obrazovky. DEWE-561 je však uživatelsky velice nepříjemný, před započetím měření je nutné složité nastavování přístroje. Uživatel musí pečlivě prostudovat návod, aby byl schopen nastavit všechny měřicí módy, než je schopen spustit měření.

Cílem této diplomové práce je vytvoření aplikace analyzátoru výkonů a účinníku na této platformě v grafickém programovacím prostředí LabVIEW, který by byl jednoduše ovladatelný a jeho použití uživatelsky snadné.

Práce nejdříve popisuje studium problematiky měření elektrického výkonu v digitalizované formě, je zde popsán elektrický výkon a metody jeho měření.

Další část se věnuje hardwarové platformě DEWE-561, používaným proudovým kleštím PNA-CLAMP-10 a měřicí kartě PCI-6250. Vytvořená aplikace umožňuje volbu mezi třemi různými zapojeními a to:

- Jednofázové zapojení, pro souměrné soustavy, kde stačí jeden proud a jedno napětí.
- Trojfázové zapojení, pro nesouměrné soustavy, kde jsou k dispozici všechny napětí a proudy.
- Aronovo zapojení, kde jsou k dispozici všechna napětí a pouze dva proudy.

Pro kontrolu běhu aplikace byl využit program pro mobilní telefony a tablety s názvem Data Dashboard. Ten uživatelům umožňuje jednorázový přístup k naměřeným hodnotám například pomocí komunikačního rozhraní Wi-Fi.

Poslední kapitoly se zabývají kalibrací analyzátoru, implementací korekčních tabulek a vyhodnocením výsledků.

2 Studium problematiky měření elektrického výkonu v digitalizované formě.

Elektrický výkon je fyzikální veličina, která vyjadřuje vykonanou elektrickou práci za jednotku času. Značí se písmenem P a jeho jednotkou je watt, značený písmenem W . Elektrický výkon je druhem výkonu, u kterého práci koná elektrická síla.

U obvodů střídavého proudu se rozlišují výkon činný, jalový, deformační a zdánlivý.

V obvodu napájeném ze stejnosměrného zdroje je výkon odebíraný zátěží daný vztahem:

$$P = U \cdot I \quad (W) \quad (1)$$

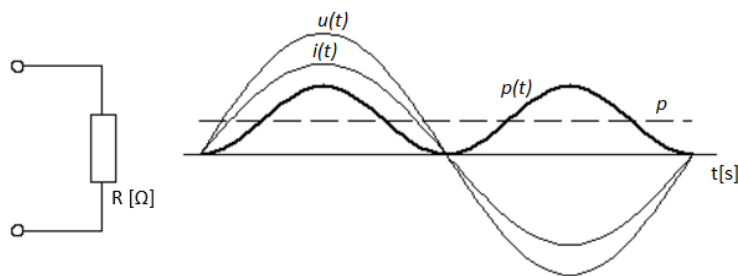
Kde U stejnosměrné napětí (V)
 I stejnosměrný proud (A)
 P stejnosměrný výkon (W)

K měření stejnosměrného výkonu nepřímou metodou postačí ampérmetr a voltmetr. Přímé měření se provede například wattmetrem s elektrodynamickým systémem, který měří stejnosměrné i střídavé výkony.

Měření výkonu ve střídavých obvodech je podstatně složitější. Při měření výkonu střídavého proudu se definuje průběh okamžitého výkonu jako součin okamžitých hodnot napětí a proudu.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (VA) \quad (2)$$

Okamžitý výkon kmitá s dvojnásobnou frekvencí oproti frekvenci základních signálů napětí a proudu. Podle velikosti fázového posunu mezi napětím a proudem je více nebo méně posunut pod nulovou hodnotu (pod osu x). Při čistě ohmické zátěži je fázový posun nulový a křivka okamžitého výkonu kmitá jen v kladné polorovině (Obr. 1.). Výkony činný P (W), jalový Q (VAr) a zdánlivý S (VA) jsou integrální hodnoty vztažené na jednu periodu základních průběhů proudu a napětí. [1]



Obr. 1. Průběh napětí, proudu a výkonu pro ohmickou zátěž [2]

Zdánlivý výkon se změří jako součin efektivních hodnot napětí U_{ef} a proudu I_{ef} . Integrální hodnota se počítá při určení efektivních hodnot U_{ef} , I_{ef} , které jsou vztaženy rovněž k jedné periodě základního průběhu:

$$U_{ef} = \frac{1}{T} \int_1^T u(t) dt \quad (V) \quad (3)$$

$$I_{ef} = \frac{1}{T} \int_1^T i(t) dt \quad (A) \quad (4)$$

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} \quad (VA) \quad (5)$$

Zdánlivý výkon S je maximální hodnota tohoto průběhu. Činný výkon je střední hodnota ze součinu okamžitých hodnot napětí a proudu za dobu jedné periody základního průběhu napětí a proudu.

$$P = \frac{1}{T} \int_1^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_1^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (W) \quad (6)$$

Pro harmonický průběh napětí a proudu s efektivními hodnotami U a I a fázovým posunem φ platí pro činný výkon výpočetní vztah:

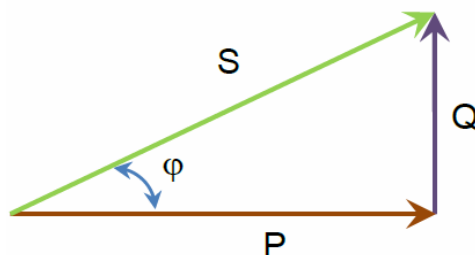
$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (W) \quad (7)$$

Obdobně pro jalový výkon platí vztah:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (VA_r) \quad (8)$$

Zdánlivý výkon je dán vektorovým součtem činného a jalového výkonu. Platí zde vztah pro trojúhelník výkonů, ten ovšem platí pouze pro harmonické signály. [1]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (VA) \quad (9)$$



Obr. 2. Trojúhelník výkonů [1]

2.1 Trojfázová soustava

Pro přenos elektrické energie střídavým proudem i pro lepší využití alternátorů a elektromotorů je výhodnější použít soustavy vícefázové. V praxi je nejrozšířenější trojfázová souměrná soustava.

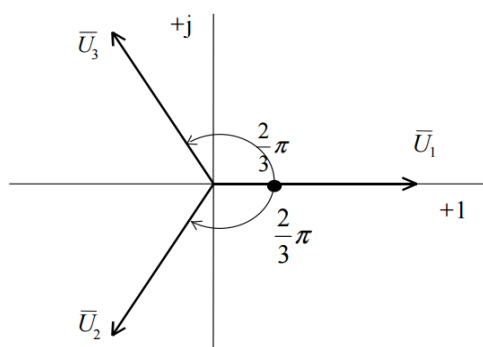
Trojfázová soustava umožňuje vytvoření točivého magnetického pole, které využívají nejjednodušší a nejrozšířenější motory – asynchronní (indukční) motory. Další výhodou je přenos energie trojfázovým vedením, které má menší spotřebu materiálu na vodiče. Trojfázové generátory jsou funkčně jednodušší a mají menší hmotnost než tři jednofázové generátory stejných výkonů. V souměrném trojfázovém generátoru se indukuje souměrná trojfázová soustava napětí. Napětí všech fází mají stejnou velikost (amplitudu) U_m a jsou vůči sobě posunuty o $1/3$ doby kmitu ($\frac{2}{3}\pi$). Když uvažujeme, že napětí první fáze má nulovou počáteční fázi, tak platí:

$$u_1 = U_m \cdot \sin(\omega t) \quad (10)$$

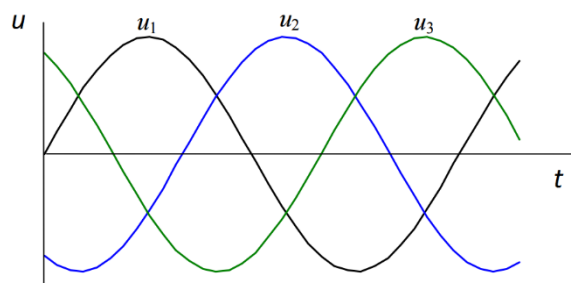
$$u_2 = U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (11)$$

$$u_3 = U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (12)$$

Maximální hodnota napětí $U_m = \sqrt{2} \cdot U$, kde U je efektivní hodnota napětí. [3]



Obr. 3. Fázorový diagram napětí [3]



Obr. 4. Časový průběh napětí jednotlivých fází [4]

2.2 Třífázový činný výkon

Činný výkon je v třífázové soustavě dán součtem výkonů v jednotlivých fázích a také se udává jako součet všech výkonů za celou soustavu.

$$P = U_1 I_1 \cos(\varphi_1) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2) + U_3 I_3 \cos(\varphi_3) \quad (W) \quad (13)$$

Kde	U_1, U_2, U_3	fázová napětí jednotlivých fází (V)
	I_1, I_2, I_3	proudy jednotlivých fází (A)
	$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	fázové posuny mezi příslušnými fázovými napětími a proudy

Při měření třífázového činného výkonu může být několik variant konfigurace napájecí třífázové sítě.

- Napájecí síť má přístupný nulový vodič - čtyřvodičová síť
- Napájecí síť nemá přístupný nulový vodič - třívodičová síť

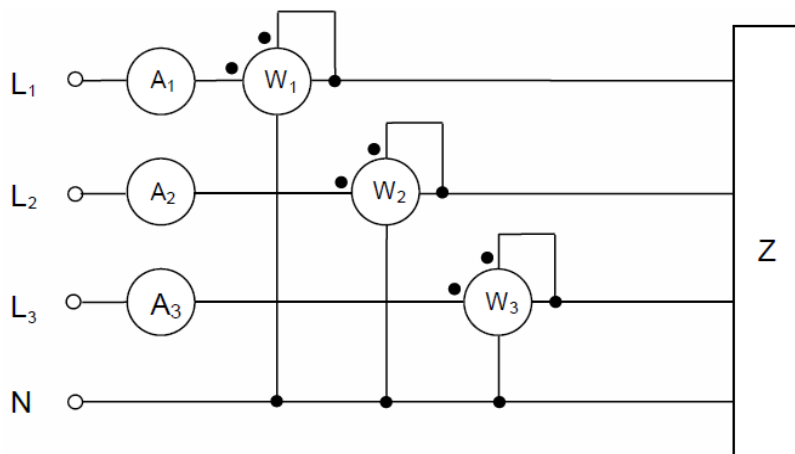
Obecná třífázová napájecí síť má různé velikosti fázových napětí a různé fázové posuny mezi fázemi. Zvláštním případem je souměrná napájecí síť, tzn. fázová napětí mají stejnou velikost U_f a taktéž fázové posuny mezi nimi $\varphi = 120^\circ$. Napětí mezi fázemi navzájem je sdružené napětí U_s . Fázory souměrné napájecí sítě tvoří rovnostranný trojúhelník. Sdružené napětí je $\sqrt{3}$ krát větší než fázové. Zátěž v třífázové soustavě může být souměrná nebo nesouměrná.

Podle Blondelova teorému v n-vodičové soustavě můžeme správně změřit činný výkon zátěže nejméně (n-1) wattmetry. Měření je korektní při obecné soustavě napětí i obecné (nesouměrné) zátěži i při nesinusových průbězích.

Praktické měření třífázového činného výkonu je zatíženo chybou metody způsobenou vlastní spotřebou měřicích přístrojů a chybou údaje danou třídou přesnosti přístrojů T_p . [1]

2.2.1 Obecná napájecí soustava, obecná zátěž a čtyřvodičová síť:

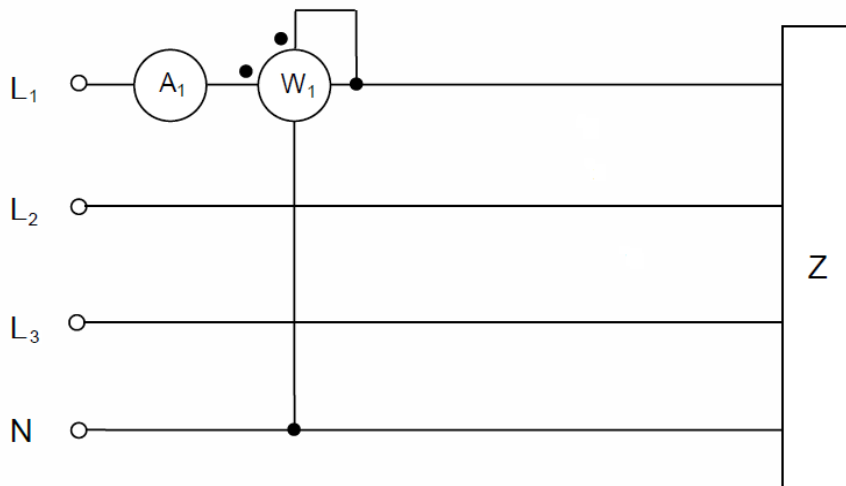
Napěťové cívkky wattmetrů jsou zapojeny na fázová napětí proti pracovnímu nulovému vodiči (N). Dle Blondelova teorému musí být použito nejméně tři wattmetrů. Údaj každého wattmetru je roven výkonu v dané fázi a součet údajů dává celkový třífázový výkon.



Obr. 5. Měření činného výkonu – čtyřvodičová síť [1]

2.2.2 Souměrná napájecí soustava, souměrná zátěž, čtyřvodičová síť:

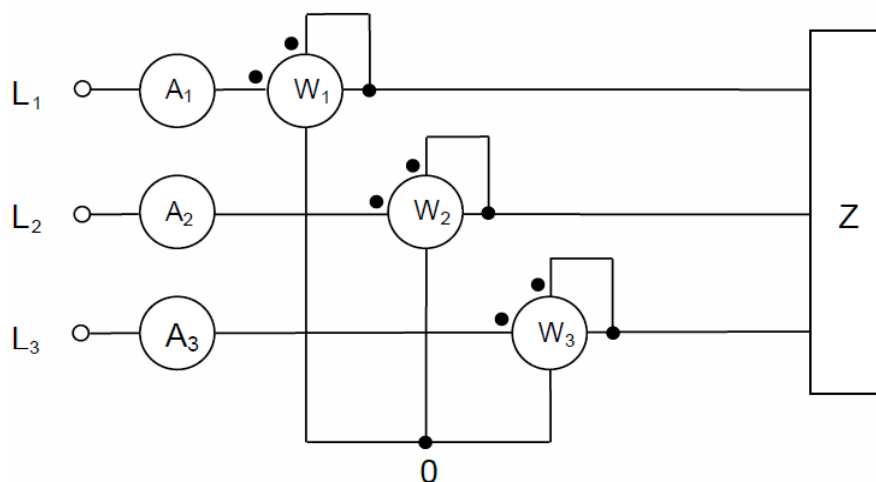
Napěťové cívkky wattmetrů musí být zapojeny na fázové napětí. Pro souměrnost napájení i zátěže jsou výkony ve všech fázích stejné. Použije se tedy jeden wattmetr a jeho údaj se vynásobí třemi.



Obr. 6. Měření činného výkonu – souměrná napájecí soustava, souměrná zátěž [1]

2.2.3 Obecná napájecí soustava, obecná zátěž a třívodičová síť:

Napěťové cívký wattmetrů jsou zapojeny na fázová napětí. Nulový vodič není k dispozici. Pro zapojení se třemi wattmetry, se musí vytvořit tzv. umělá nula. Tu tvoří spojené konce napěťových cívek tří wattmetrů. Pokud vnitřní odpory wattmetrů nejsou shodné, pak údaje wattmetrů neodpovídají výkonům v jednotlivých fázích, ale součet údajů dává celkový třífázový výkon.



Obr. 7. Měření činného výkonu – třívodičová síť [1]

2.2.4 Aronovo zapojení

Dle Blondelova teoremu stačí pro měření činného výkonu dva wattmetry. Aronovo zapojení lze použít pro souměrnou i nesouměrnou (obecnou) soustavu napětí, souměrnou i nesouměrnou (obecnou) zátěž, avšak třívodičovou síť.

Souměrná soustava napětí, nesouměrná zátěž, třívodičová síť:

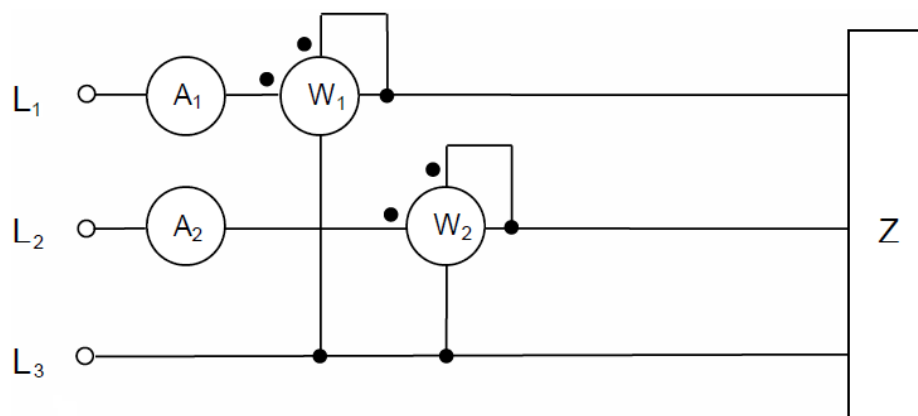
Při měření třemi wattmetry v třívodičové síti je celkový výkon dán součtem výkonů naměřených jednotlivými wattmetry:

$$P = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt \quad (W) \quad (14)$$

Pro proudy v třívodičové síti platí $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, takže $i_3 = -(i_1 + i_2)$. Další úpravou rovnice pro celkový výkon dojdeme k Aronovu zapojení:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 - u_3 (i_1 + i_2)) dt \quad (W) \quad (15)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ((u_1 - u_3) i_1 + (u_2 - u_3) i_2) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{13} i_1 + u_{23} i_2) dt = P_{w1} + P_{w2} \quad (W) \quad (16)$$



Obr. 8. Aronovo zapojení pro měření činného výkonu [1]

3 Studium hardwarové platformy DEWE-561

DEWE-561 je tří fázový analyzátor kvality napájení a záznamník výkonů, který velice podrobně analyzuje nejdůležitější parametry systému elektrického napájení. Všechny elektrické veličiny je možné zobrazit jak v číselné, tak v grafické podobě s průběhy a fázory. Kombinace softwaru s vysokou kapacitou pro měření a flexibilní zprávě generátorů umožňuje uživateli řešit téměř každý úkol v oblasti měření energie. Zajišťuje přesná měření dle norem IEC 61000-4-30 třídy A, a EN50160, což jsou standardy pro měření kvality energie.

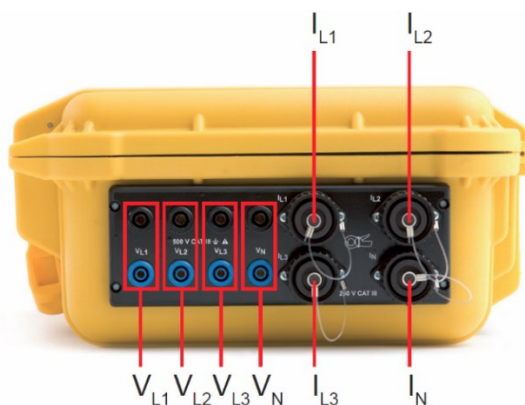
- Přenosný systém pro sběr dat
- Až 16 kanálů s diferenciálními vstupy (ve spojení s DEWE-MDAQ moduly)
- 4 vstupy napětí (ve spojení s MDAQ-PQL-SUB-HV)
- 4 proudové vstupy pro proudové kleště
- Vnitřní 12" TFT displej
- Měření- FFT- Harmonická analýza
- Výpočet výkonů, účinníků
- Zaznamenávání všech parametrů ve vlastních intervalech
- Zobrazování dat ve formě diagramů, histogramů, diagram spotřeby
- Analýza chyb, statistiky, alarmy
- Měření flikru, spekter
- Grafy, vektorové diagramy, matematické funkce
- Bezdrátové ovládání, GPS
- Upozornění na email [5]



Obr. 9. Analyzátor sítě DEWE-561 [7]

Tab. 1. Parametry DEWE-561 [6]

Specifikace vstupů	
Vstupní kanály	4 napěťové, 4 proudové
Napěťový rozsah U_{max}	$\pm 1400V$
Šířka pásma vstupních zesilovačů	DC až 300 kHz
Maximální vstupní proud při použití proudových kleští	Záleží na typu kleští
Maximální vstupní proud při použití Rogowského cívky PNA-A100-1000-120	10 000 A
A/D převod	
Vzorkovací frekvence	1 MS/s
Rozlišení	16 bitů
Digitální I/O	
Digitální I/O, TTL logika	2x DIN 1x DOUT
Prostředí	
Pracovní teplota	0 to +50 °C
Skladovací teplota	-20 to +70 °C
Další parametry	
Pevný disk	32 GB
Obrazovka	12" TFT (1280 x 800)
Procesor	Intel® Core™2 Duo 2 GHz
Rozhraní	2x USB, 1x Ethernet, 1x RS-232
Napájení	95 to 260 VAC 50 / 60Hz
Rozměry:	(Š x H x V): 360 x 300 x 150 mm
Váha	5 kg



Obr. 10. Proudové a napěťové vstupy [5]

3.1 Proudové kleště PNA-CLAMP-10

Tyto kleště byly použity pro měření proudu. Jsou schopny měřit střídavý proud do 12 A. Výstupní signál odpovídá 100 mV / A AC. Jedná se o kleště MN 71 značky Chauvin Arnoux s konektorem pro připojení k DEWE-561. Jak je vidět z tab. 3. způsobují fázový posun až 5°, což se výrazně projeví při počítání výkonů.



Obr. 11. Proudové kleště MN 71 a typ konektoru [8], [9]

Tab. 2. Parametry proudových kleští PNA-CLAMP-10 [8]

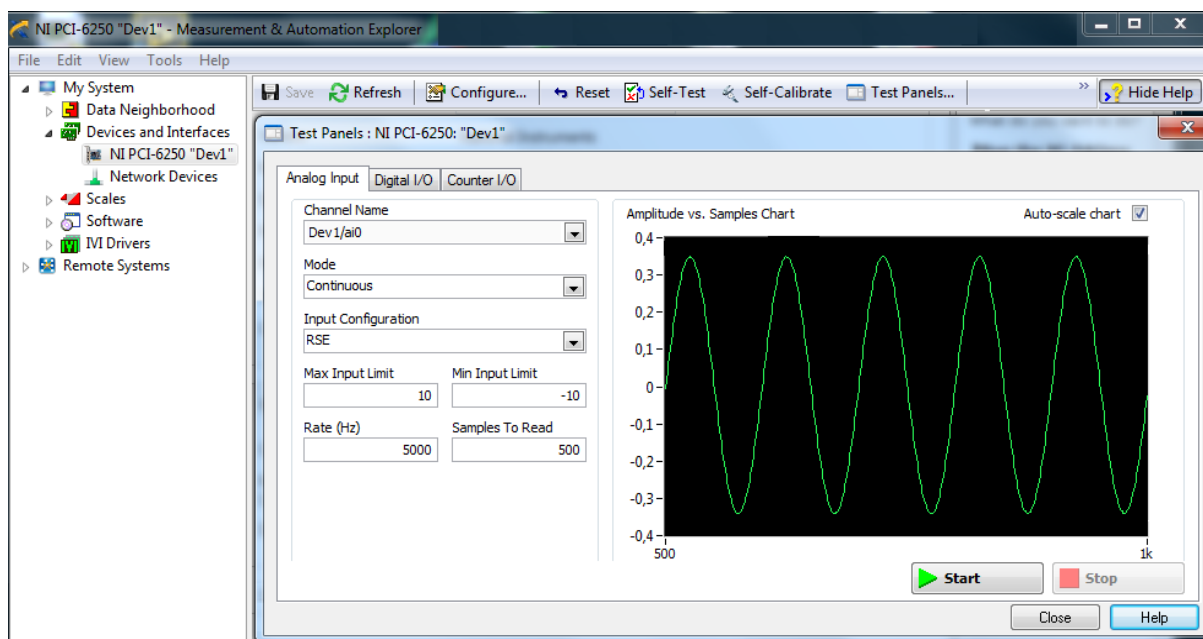
AC input range	0,01 to 12 A
Output	100 mV / A AC
Šířka pásma	40 Hz...10 kHz
Pracovní teplota	-10° do +55°
Typ konektoru	C16-1, 6+PE

Tab. 3. Přesnost a fázový posun kleští PNA-CLAMP-10

Proud	0,01 A...0,1 A	0,1 A...1 A	1A...5A	5A...12A
Přesnost v % výstupního signálu	$\leq 3\% + 0,1 \text{ mV}$	$\leq 2,5 \%$	$\leq 1 \%$	
Fázový posun	není specifikováno	$\leq 5^\circ$	$\leq 3^\circ$	$\leq 3^\circ$

3.2 Měřicí karta NI PCI-6250

DEWE-561 pracuje s touto měřicí kartou. Při práci s měřicími kartami National Instruments je nutné mít tyto karty přidáné v software s názvem „Measurement & Automation Explorer“. Po otevření software by měla být karta detekována v záložce „Devices and Interfaces“. Vždy je označena názvem a číslem. Fyzicky přítomné karty jsou označeny zeleně, simulované karty žlutě. Karty odpojené, jsou označeny červeným křížkem.



Obr. 12. Testovací panel v NI MAX



Obr. 13. Měřicí karta NI PCI-6250 [10]

Parametry karty NI PCI-6250

Tab. 4. Parametry karty NI PCI-6250 [11]

Analogové vstupy	
Počet kanálů	8 differential or 16 single ended
Rozlišení AD převodníku	16 bitů (AD převodník s postupnou aproximací)
Vzorkovací frekvence	
Maximum	
Pro jeden kanál	1,25 MS/s
Pro více kanálů	1 MS/s
Minimum	No minimum
Vstupní vazba	DC
Maximální napěťový rozsah	
Rozsah	± 10 V
Přesnost	1920 μ V
Citlivost	112 μ V
Minimální napěťový rozsah	
Rozsah	± 100 mV
Přesnost	52 μ V
Citlivost	6 μ V
Počet rozsahů	7
Analogové výstupy	
Počet kanálů	0
Digitální vstupy a výstupy	
Počet kanálů	24

3.3 Převod analogového signálu na digitální

Karta převádí analogový signál na digitální pomocí AD převodníku s postupnou aproximací. AD převodník je elektronická součástka určená pro převod spojitého signálu na signál diskretní. Důvodem tohoto převodu je umožnění zpracování původně analogového signálu na číslicových počítačích. Mezi nimi v současnosti převažují digitální signální procesory DSP, které jsou právě na zpracování takových signálů specializované. V digitální podobě se také dají signály daleko kvalitněji zaznamenávat a přenášet. Opačný převod z digitálního signálu na analogový zajišťuje D/A převodník.

Princip převodu

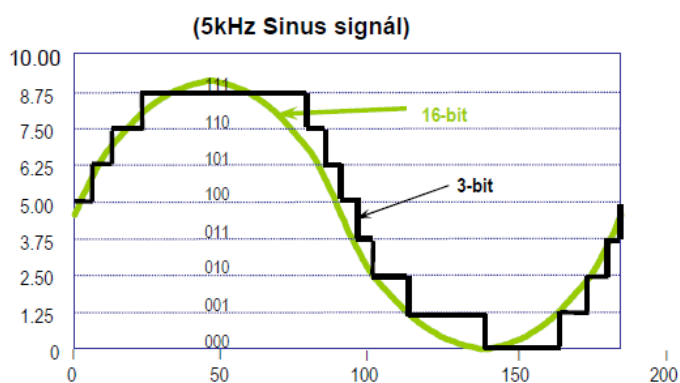
Převod spojitého signálu na diskretní se skládá ze dvou fází. Nejprve se provede vzorkování signálu, a potom následuje kvantování.

Vzorkování

Úsek spojitého signálu se sice dá donekonečna zvětšovat a pozorovat tak jeho nekonečně malé detaily, ale protože počítače mají pouze konečnou kapacitu paměti a ani nejsou nekonečně rychlé, musí se u reálného vzorkování při A/D převodu omezit pouze na nezbytně nutné množství vzorků, které se dále zpracovává. Vzorkování se provede tím způsobem, že se rozdělí vodorovná osa signálu na rovnoměrné úseky a z každého úseku se odebere jeden vzorek. Je přitom zřejmé, že se tak z původního signálu ztratí mnoho detailů, protože namísto spojitě čáry, kterou lze donekonečna zvětšovat dostaneme pouze množinu diskretních bodů s intervalem odpovídajícím použité vzorkovací frekvenci.

Kvantování

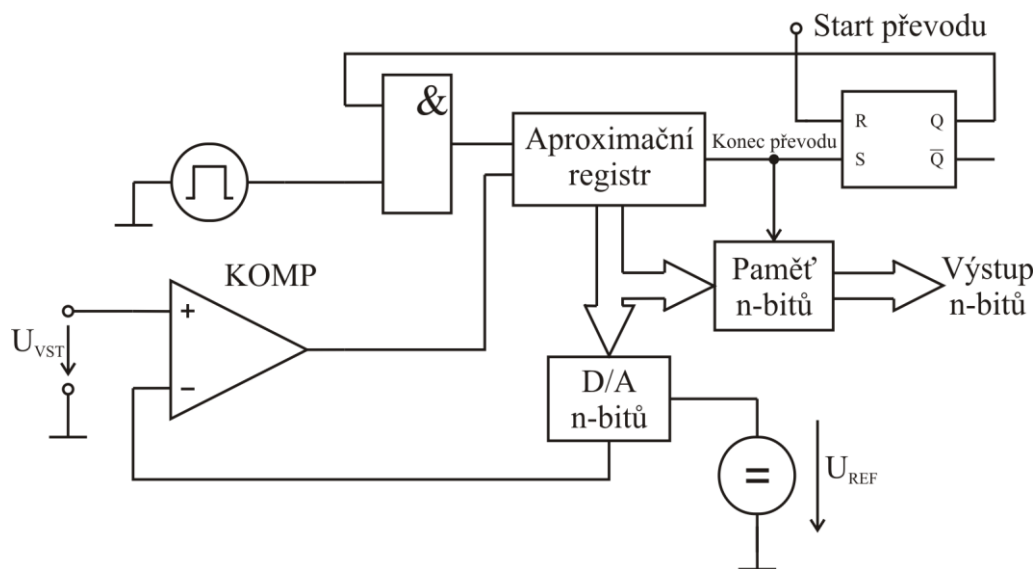
Aby bylo možné určit, které hodnoty má po kvantování nabývat určitý vzorek, je třeba rozdělit prostor kolem jednotlivých hodnot na toleranční pásy. Kterémukoliv vzorku, který padne do daného tolerančního pásu, je při kvantování přiřazena daná hodnota. Kvantované hodnoty se ve většině případů liší od skutečných navzorkovaných hodnot. Velikost kvantizační chyby je vzdálenost mezi kvantovanými a původními navzorkovanými body. Velikost této chyby se pohybuje v intervalu $+1/2$ až $-1/2$ kvantizační úrovně. [12]



Obr. 14. Princip kvantování [13]

3.4 AD převodník s postupnou aproximací

Karta NI PCI-6250 využívá AD převodníku s postupnou aproximací. Při použití postupné aproximace se nastaví jednotlivé váhové bity. Začíná se bitem MSB a končí bitem LSB. Na začátku cyklu převodu se nastaví hodnota převodu výstupu aproximačního registru na 10000000, čemuž odpovídá výstup zpětnovazebního D/A převodníku $U_{REF}/2$. Toto napětí se porovnává v komparátoru s vstupním napětím. Je-li U_{VST} větší než $U_{REF}/2$, ponechá se MSB nastaven na 1, v opačném případě se vrátí na 0. V druhém kroku se nastaví na 1 další váhový bit. Na výstupu tedy bude 11000000 nebo 01000000, podle výsledku předchozího kroku. Opět se porovná zpětnovazební a vstupní napětí a aktuální bit se nastaví na 1 nebo se vrátí na 0, takto se postupuje až k LSB. U tohoto převodníku je doba nezávislá na vstupním napětím. Změna vstupního napětí během převodu způsobí chybu, a proto musí být vstup opatřen vzorkovacím obvodem. Převodníky se vyrábí 8bitové a 16bitové. [12]



Obr. 15. AD převodník s postupnou aproximací [12]

3.5 Přepínání rozsahů

Rozsahy je možné měnit programově a to pomocí rozhraní RS-232. Toto je realizováno pomocí standardu VISA, který poskytuje rozhraní mezi hardwarem a vývojovým prostředím. Z manuálu (viz příloha 3) se dá zjistit, jak vypadá obecný příkaz pro zápis nastavení kanálu.

Příkaz pro nastavení rozsahu: **##JcaFFAGMN\r**

Odpověď modulu na správně zapsaný rozsah: **!PaaACK\r**

ca	Adresa kanálu
00, 01, 02, 03	- odpovídá napětovým kanálům U_1, U_2, U_3, U_n
04, 05, 06, 07	- odpovídá proudovým kanálům I_1, I_2, I_3, I_n

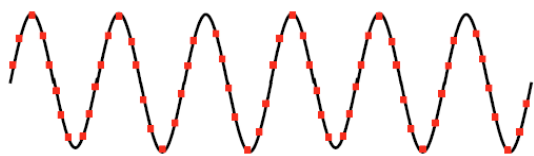
FF	Možnost zapnutí antialiasing filtru 00 = Filtr vypnut 01 = Filtr zapnut (3 kHz)						
A	Nastavitelné zesílení PQL-BASE Vždy 0, PQL-BASE nemá nastavitelné zesílení.						
GMN	<table> <tr> <td>G</td><td>Gain Sub-modul</td></tr> <tr> <td>M</td><td>Model of Sub module</td></tr> <tr> <td>N</td><td>Model of Sub module</td></tr> </table>	G	Gain Sub-modul	M	Model of Sub module	N	Model of Sub module
G	Gain Sub-modul						
M	Model of Sub module						
N	Model of Sub module						

Tab. 5. Volba napěťového a proudového rozsahu

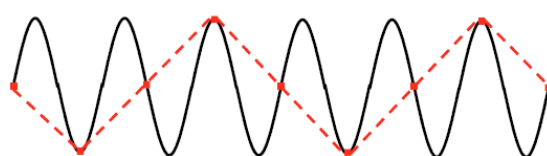
PQL-HV (napěťový modul)	PQL-CURR (proudový modul):
G: Gain Sub module 0: 1400 Volt 1: 800 Volt 2: 400 Volt 3: 200 Volt M: Not used; could be 0 to F N: Not used; could be 0 to	G: Gain Sub-Modul LEM converter mode: 0: 10 Ampere 1: 3 Ampere 2: 1 Ampere 3: 0.3 Ampere Voltage mode: 0: 10 Volt 1: 3 Volt 2: 1 Volt 3: 0.3 Volt Rogowsky mode: 0: 10 kAmpere 1: 3 kAmpere 2: 1 kAmpere 3: 300 Ampere 4: 100 Ampere 5: 30 Ampere 6: 10 Ampere M: measuring mode 0: LEM converter 1: Voltage (incl. Shunt) 2: Rogowsky 3: Voltage N: Not used; could be 0 to F;

Zapnutí antialiasing filtru

Aliasing je zkreslení signálu způsobené podvzorkováním při diskretizaci signálu. Vzorkování příliš nízkou frekvencí může způsobit, že signály vyšších frekvencí se po navzorkování jeví jako signály nízkých frekvencí. Aby nedocházelo k aliasingu neboli zkreslení, musí být splněno Nyquistovo kritérium. Pokud při vzorkování dojde k aliasingu, je nemožné rekonstruovat původní signál. Vzorkovací frekvence musí větší, nebo rovna, než je dvojnásobek nejvyšší frekvence vyskytující se v signále. Pokud tato podmínka splněna není, dochází k překrytí frekvenčních spekter vzorkovaného signálu a tedy ke ztrátě informace. Antialiasing filtr je filtr typu dolní propust. DEWE 561 umožňuje jeho zapnutí odesláním daného příkazu na adresu Base modulu- 00. [14]



Obr. 16. Vzorkovaný signál



Obr. 17. Aliasing vzniklý nedostatečnou vzorkovací frekvencí [13]

Z manuálu (viz příloha 3) se dá zjistit, jak vypadá obecný příkaz pro nastavení filtru. Příkaz pro nastavení filtru: **##PaaFLB[Filter]\r**

aa	Adresa Base modulu- 00
[Filter]	BE3O: Bessel characteristic 3rd order; mezní frekvence 300 kHz BE5O: Bessel characteristic 5rd order; mezní frekvence 3 kHz

Výsledný příkaz pro nastavení filtru BE5O, vypadá takto **##P00FLBBE5O\r**

Pro zjištění, jaký filtr je nastaven slouží příkaz **??PaaFLB\r**

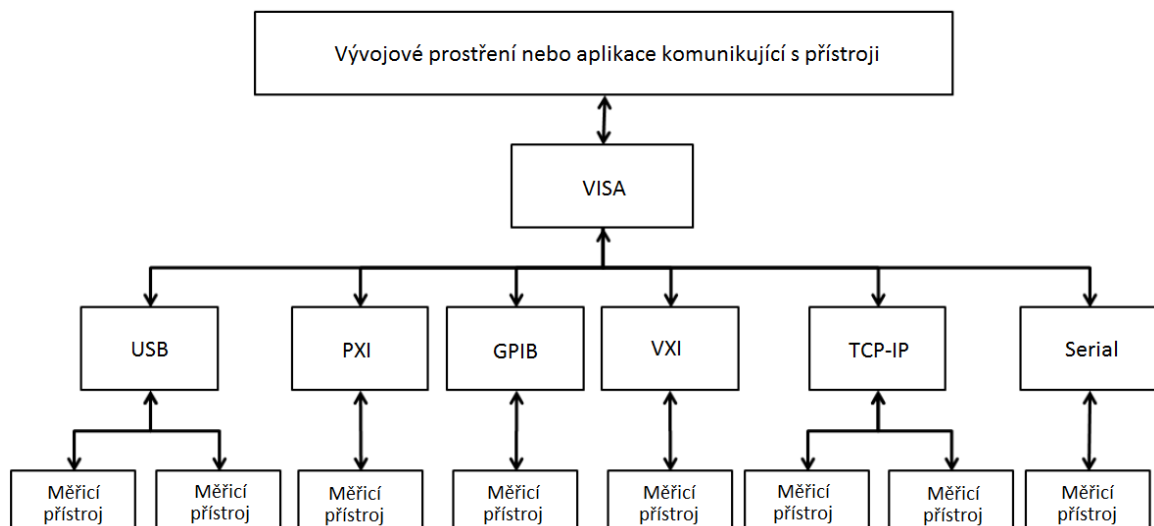
4 Realizace analyzátoru P, Q, S a PF pro různá 3f zapojení.

V první části této kapitoly je popsána VISA, což je rozhraní mezi hardwarem a vývojovým prostředím LABVIEW. Na toto téma navazuje princip přepínání rozsahů. Dále vyčítání dat, které zajišťuje knihovna DAQmx. V poslední části je popsán princip výpočtu výkonů v jednotlivých zapojeních.

4.1 VISA

VISA je standard pro konfiguraci a programování přístrojů podporujících komunikační rozhraní GPIB, Serial, USB, Ethernet, VXI nebo PXI. Poskytuje rozhraní mezi hardwarem a vývojovým prostředím, jakým je například LABVIEW, LabWindows/CVI nebo Measurement Studio pro Microsoft Visual Studio.

Samotná VISA neposkytuje nové možnosti programování při komunikaci s přístroji, pouze pro komunikaci s nimi využívá a sjednocuje funkce nižších ovladačů. Hierarchie a návaznost VISY na nižší úrovně je zobrazena na obr. 18.



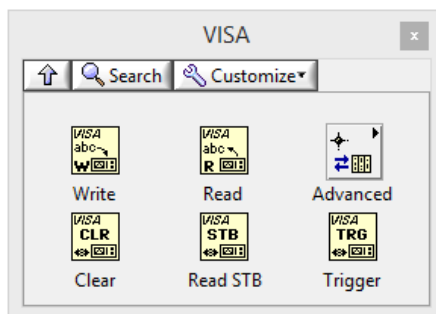
Obr. 18. Ukázka Visa architektury [15]

Výhody VISA

VISA je schopna kontrolovat například GPIB, VXI nebo sériové přístroje pomocí volání příslušných ovladačů pro jednotlivé standardy. V tomto případě je VISA jakýmsi prostředníkem mezi jednotlivými ovladači a vývojovým prostředím. Například, pokud je potřeba zaslat ASCII textový příkaz do textově-orientovaného přístroje, při použití VISY se není třeba starat, zda jde o GPIB nebo VXI, o toto se postará VISA sama. Toto následně umožňuje záměnu zařízení za jiné s rozdílným komunikačním rozhraním, aniž by se musely provádět složité softwarové úpravy. [15]

Další výhodou je přenositelnost programů napsaných pomocí VISA funkcí mezi jednotlivými platformami. Je to díky sjednocení VISY přes všechny podporované platformy. Lze tedy jednoduše přenést program napsaný v LabVIEW mezi systémy Windows a Linux bez nutnosti zásahu do kódu.

Pravděpodobně největší výhodou je však to, že VISA je objektově-orientovaná, což ji dělá velice jednoduše a intuitivně použitelnou. VISA je díky tomu i velice jednoduše rozšiřitelná, což je přínos pro přidávání nových funkcí. Toto dělá z VISA velice robustní a jednoduše použitelné API, které následně vede k jednoduché tvorbě komunikačních programů.



Obr. 19. Visa bloky v LabVIEW

VISA Programování

Při práci s VISA je důležité si uvědomit, že se jedná o objektově-orientovaný I/O programovací jazyk. Nejdůležitějším objektem VISA je **Resource**. Pro práci s těmito objekty se používají funkce, které se nazývají **Operations**. Tyto objekty mají také vlastní proměnné, které obsahují informace o daném objektu, ty se označují **Attributes**.

Resources

Specifikuje konkrétní spojení s přístrojem a jeho vlastnostmi, umožňuje k němu přístup odkudkoli z vývojového prostředí pomocí podporovaných funkcí. Resource je například GPIB, sériová linka na portu COM1, textově-orientované VXI, USB a další.

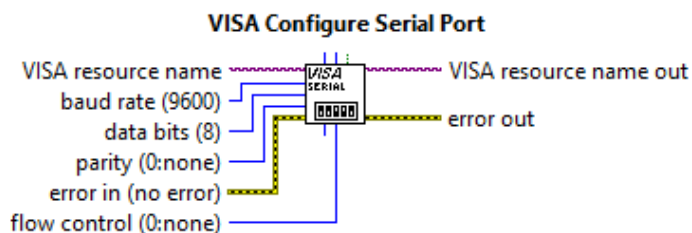
Operations

Jedná se o funkce, které lze provést s daným Resource, nejběžnější při komunikaci s textově-orientovaným přístrojem jsou funkce Read a Write, které se používají pro zasílání příkazů přístroji (VISA Write) a vyčítání dat z přístroje (VISA Read).

Attributes

Jde o vlastnosti Resource, které lze pomocí Attribute Node nastavit, upravit nebo naopak získat jejich hodnotu. Tímto lze například nastavit vlastnosti sériového spojení, jako jsou rychlost, paritní bit, stop bit atd. [15]

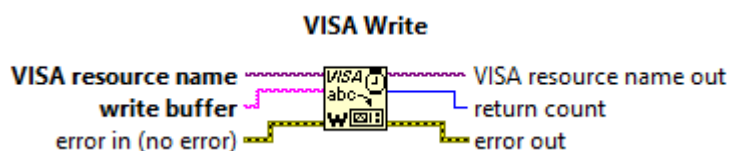
Funkce VISA Configure Serial Port



Obr. 20. VISA Configure Serial Port

Funkce VISA Configure Serial Port inicializuje sériový port „VISA resource name“ se specifikovaným nastavením.

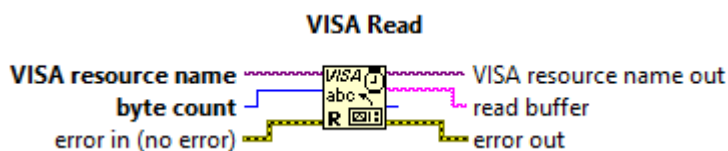
Funkce VISA Write



Obr. 21. Funkce VISA Write

Funkce po svém spuštění zasílá obsah textového vstupu Write Buffer do příslušného přístroje.

Funkce VISA Read

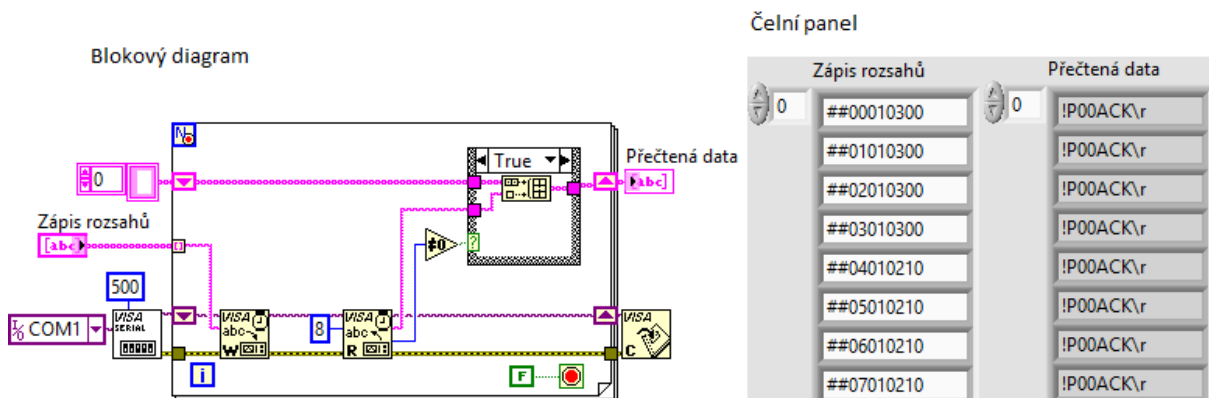


Obr. 22. Funkce VISA Read

Funkce po svém spuštění čeká, až se přístrojový buffer naplní na požadovaný počet bajtů, které se poté najednou vyčtou. Pokud však čekání na naplnění bufferu požadovaným počtem bajtů překročí nastavený čas (tento čas se nastavuje pro konkrétní spojení), funkce skončí chybou Timeout. [15]

4.2 Přepínání rozsahů v programu

Nejprve bylo zapotřebí zajistit přepínání rozsahů. To znamená vytvořit komunikaci mezi PC a vstupními moduly MDAQ-PQL. Na vstup smyčky přichází pole stringů, které odpovídá nastavení osmi rozsahů- čtyři proudové, čtyři napěťové. V každém oběhu smyčky dojde k zapsání jednoho stringu. Po zapsání všech rozsahů dojde k ukončení smyčky a uzavření spojení funkcí Visa Close. Odpověď modulu na správné zapsání rozsahu je !PaaACK\r, kdy aa značí adresu modulu a ACK je acknowledge, tzn. potvrzení, že rozsah byl zapsán správně.



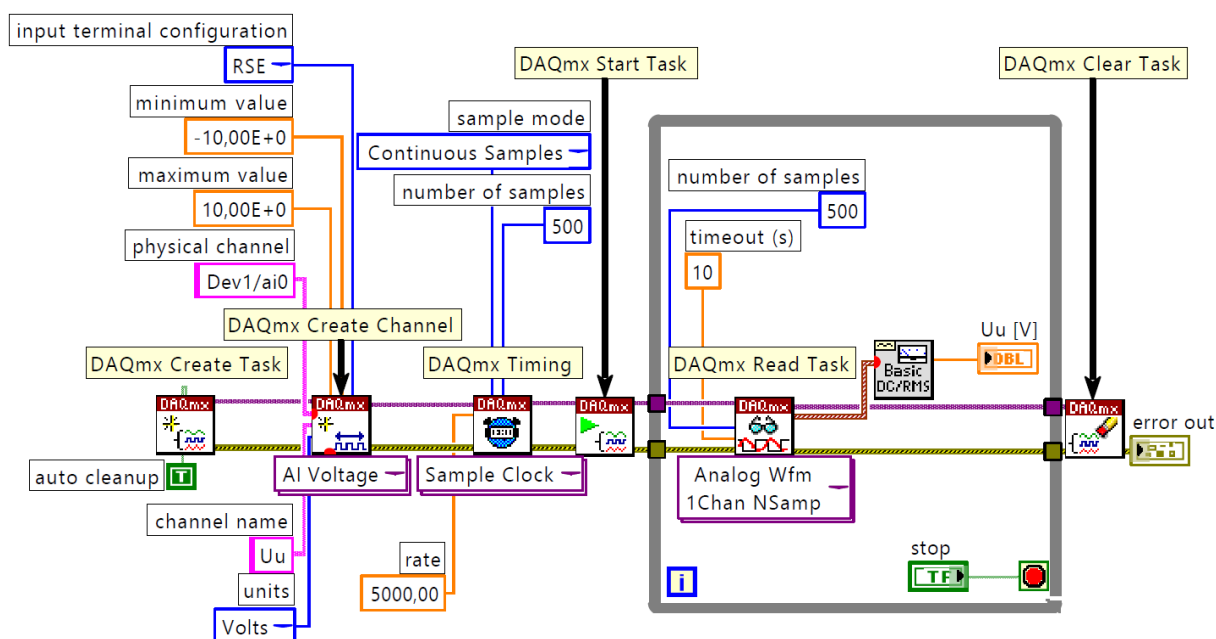
Obr. 23. Čelní panel a blokový diagram pro přepínání rozsahů

4.3 Vyčítání dat v programu

Obrázek 24. zobrazuje blokový diagram v LabVIEW pro vyčítání napětí první fáze U_u . „DAQmx Create Task“ vytvoří úlohu a následuje definování kanálu. Ve vytvořené aplikaci pro měření výkonů je těchto kanálů za sebou celkem osm, čtyři napěťové U_u , U_v , U_w , U_n a čtyři proudové I_u , I_v , I_w , I_n . U každého kanálu se definuje, z jaké karty jsou data vyčítána (Dev1) a na jakém pinu karty se daná data nacházejí (ai0). Minimum a maximum value je volba rozsahu karty. RSE je označení pro Referenced Single-Ended, to znamená, že měření je vztaženo k systémové zemi. „DAQmx Timing“ je VI pro nastavení vzorkovací frekvence, módu pro vyčítání dat a počtu vzorků, které se mají vyčíst.

Vzorkovací frekvence byla zvolena 5 kHz proto, aby bylo možné vzorkovat signály do padesáté harmonické, tzn. do 2,5 kHz. „DAQmx Start Task“ úlohu odstartuje a inicializační data vstupují do while smyčky. Vyčítání dat je v této smyčce prováděno, dokud nedojde k jejímu ukončení stiskem tlačítka stop na čelním panelu.

V případě, že je vstupní signál o frekvenci 50 Hz, tak při konfiguraci vzorkování podle obrázku bude na výstupu „DAQmx Read Task“ vždy pět period signálu. Z těchto pěti period se v každém oběhu smyčky počítá efektivní hodnota napětí a zobrazuje v indikátoru U_u [V]. „DAQmx Clear Task“ úlohu ukončí.



Obr. 24. Vyčítání dat v programu

4.4 Konfigurace

Ve vytvořené aplikaci, lze přepínat mezi třemi panely a to konfigurací, osciloskopem a měřeními výkony. V okně konfigurace je možnost volby napěťového a proudového rozsahu, a volby zapojení. Analyzátor měří výkony ve třech různých zapojeních a to trojfázové zapojení- k dispozici jsou tři napětí a tři proudy. Aronovo zapojení- v případě, že jsou k dispozici tři napětí a dva proudy a jednofázové zapojení. To se využije u souměrných soustav, kde stačí jeden proud a jedno napětí.

Napěťové rozsahy je možno volit mezi 200 V, 400 V, 800 V a 1400 V. Proudové rozsahy odpovídají výstupnímu napětí různých typů proudových kleští. Lze volit čtyři a to 0.3 V, 1 V, 3 V a 10 V. Proudové kleště PNA-CLAMP-10 mají výstupní napětí maximálně 1.2 V, ten odpovídá proudu 12 A.

Násobící konstanty se využijí v případě měření na sekundárních vinutích měřicích transformátorů proudů a napětí. Abychom dostali hodnoty na primárním vinutí, změřená napětí, popřípadě proudy se vynásobí danou konstantou. Například u měřicího transformátoru napětí 6 kV/ 100 V je napěťová konstanta 60.

Měřené výkony je možno ukládat s nastavitelnou periodou.

The screenshot shows the 'Konfigurace' (Configuration) window of a software application. It features several tabs at the top: 'Konfigurace', 'Osciloskop', and 'P,Q,S, Cos fi'. The 'Konfigurace' tab is active.

Key settings visible include:

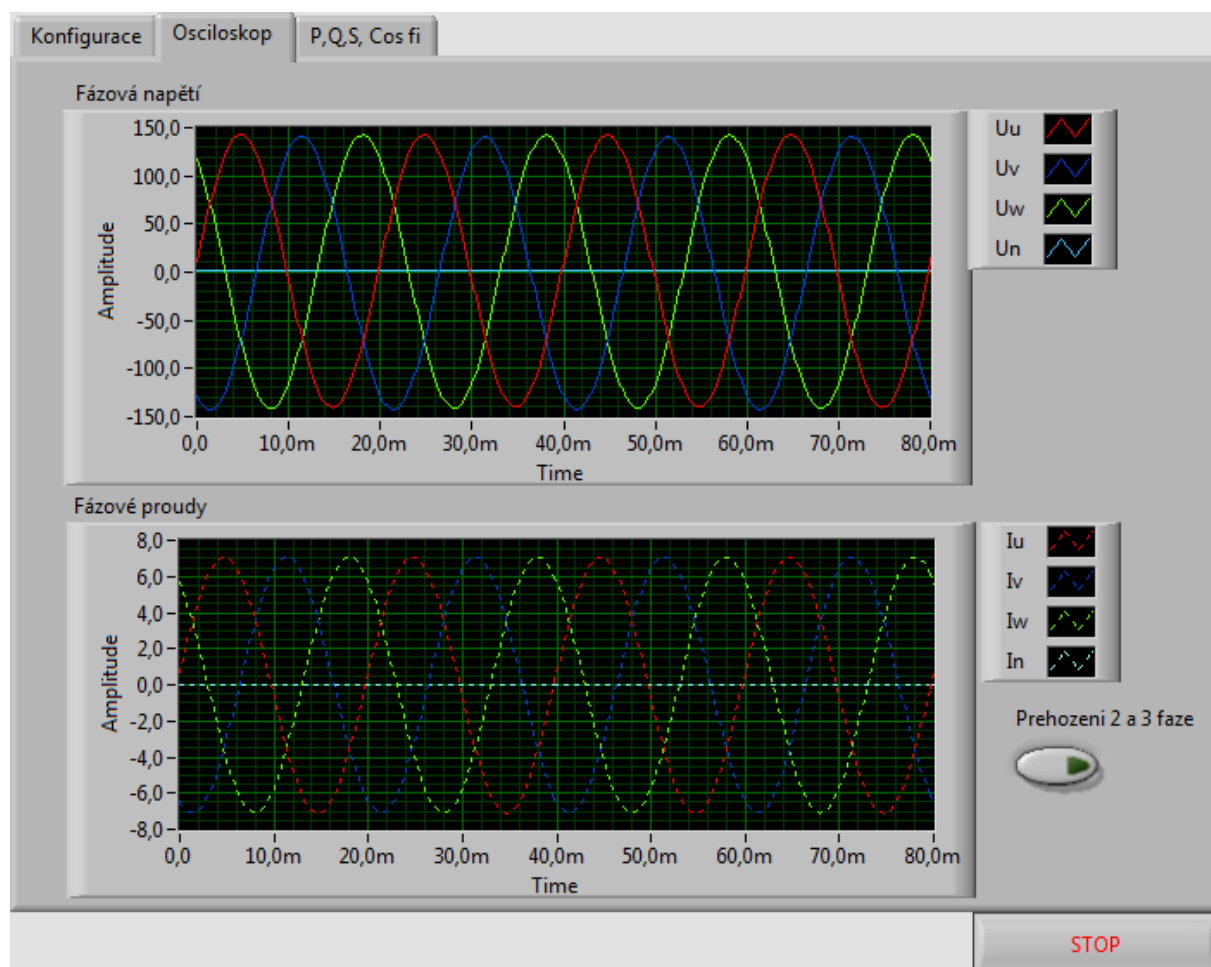
- Perioda ukládání** (Storage period): Set to 1s.
- Maximalni velikost souboru [kB]** (Maximum file size): Set to 2.
- Zapojení** (Connection): Radio buttons for 'Trojfázové zapojení' (selected), 'Aronovo zapojení', and 'Jednofázové zapojení'.
- Voltage and Current Ranges:** A grid of controls for UL1, UL2, UL3, Un, IL1, IL2, IL3, and IN. Each has a dropdown menu and a text box. UL1, UL2, UL3, and Un are set to '200 Volt'. IL1, IL2, IL3, and IN are set to 'VM 1 V'.
- Konstanty měřicího transformátoru** (Transformer constants): A section with six controls for K_{MTN1} , K_{MTP1} , K_{MTN2} , K_{MTP2} , K_{MTN3} , and K_{MTP3} . All are set to 1.

Obr. 25. Okno konfigurace

4.5 Osciloskop

Horní graf osciloskopu zobrazuje fázová napětí, jehož efektivní hodnota je 100 V, spodní graf fázové proudy s efektivní hodnotou 5 A. Fázový posun je nulový.

Aplikace má možnost softwarové přehození druhé a třetí fáze, v případě, že by nebyl dobře zapojen jejich sled. První fáze je vztažná, a pokud by následující fáze nebyla fáze druhá, ale třetí, je možno využít tohoto softwarového přehození.



Obr. 26. Okno osciloskopu

4.6 P, Q, S, Cos φ

Poslední záložka aplikace zobrazuje výkon zdánlivý, činný, jalový a účinník ve všech fázích. Data je možné ukládat do souboru s volitelnou periodou. Název souboru se odvozuje od data a času. Aby naměřené soubory nebyly příliš velké, je možné soubor omezit na velikost souboru. Po překročení velikosti např. 1 MB, se vytvoří soubor nový. To znamená, že v případě výpadku napájení DEWE-561 nedojde ke ztrátě všech naměřených dat.

The screenshot shows the 'P, Q, S, Cos φ ' configuration window. It features three tabs: 'Konfigurace', 'Osciloskop', and 'P, Q, S, Cos φ '. The main area contains several input fields for power and voltage measurements, organized in a grid. Each field has a small icon with a plus/minus sign and a '0' value.

Measurement	Unit	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
Su, v, w, n	[VA]	501,0	500,5	501,3	0,00
Scelk.	[VA]	1503			
Pu, v, w, n	[W]	500,9	501,0	501,4	0,00
Pcelk.	[W]	1503			
Qu, v, w, n	[var]	0,000	0,000	0,000	0,00
Qcelk.	[var]	0,00			
cos φ		1,000	1,001	1,000	0,00
cos φ celk.		1,00			
Uu, v, w, n	[V]	100,0	100,0	100,0	0,00
Iu, v, w, n	[A]	5,00	5,00	5,00	0,00

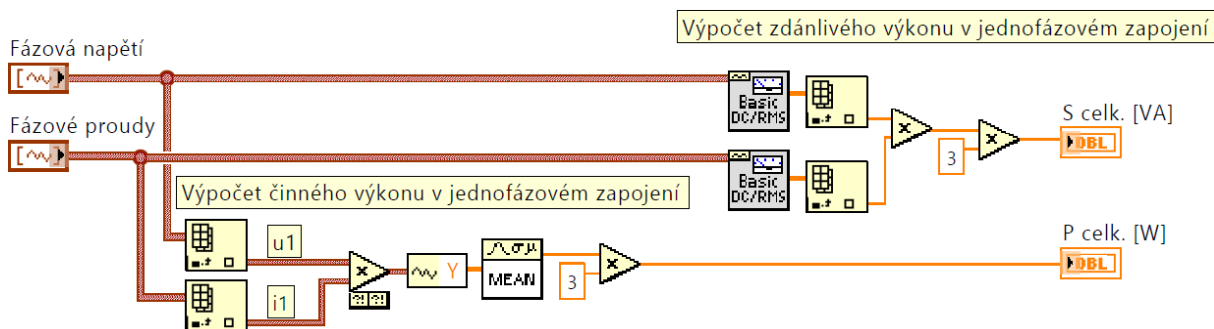
Below the input fields is a 'Ukladat' button. To the right of the input fields is a 'size (in bytes)' field with a value of '0'. Below this is an 'error out' section with a 'status' field (showing a green checkmark) and a 'code' field (showing '1073676294'). Below the 'error out' section is a 'source' field with a text area containing 'VISA Read in Initialize.vi->MAIN_kol_dewe_561.vi'. At the bottom right of the window is a 'STOP' button.

Obr. 27. Okno měřených výkonů a účinníku

4.7 Výpočet výkonů v jednotlivých zapojeních

Výpočet činného a zdánlivého výkonu v jednofázovém zapojení

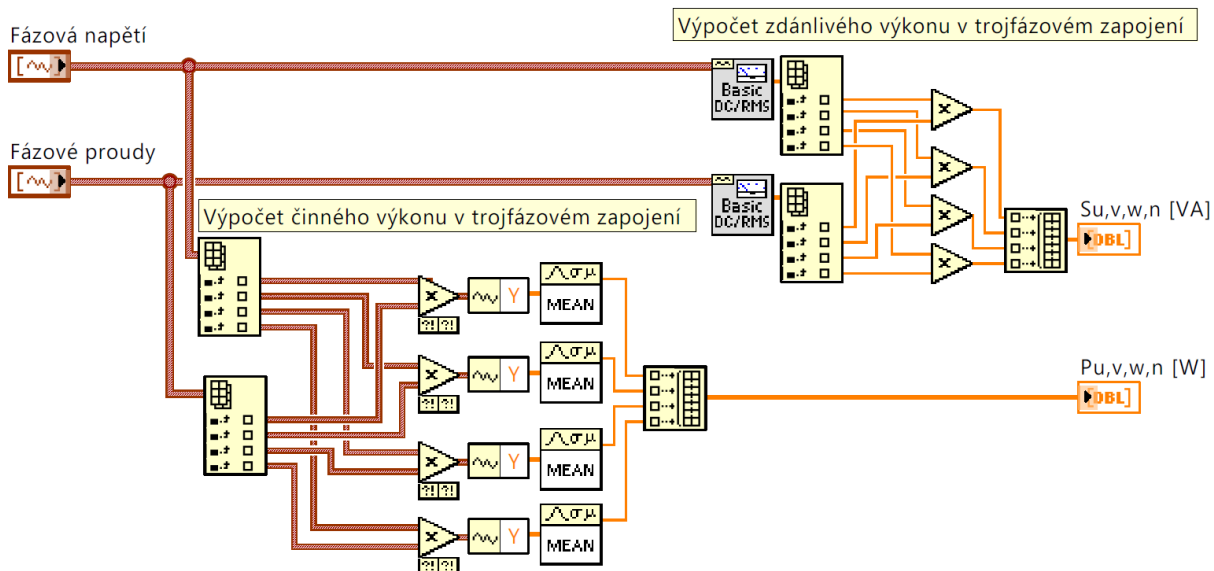
Jednofázové zapojení se využije u souměrné soustavy, kde stačí jeden proud a jedno napětí. Činný výkon se vypočítá vynásobením okamžitých hodnot napětí a proudu, a jejich střední hodnoty. Zdánlivý výkon je dán součinem efektivní hodnoty proudu a napětí. Protože činný a zdánlivý výkon je u souměrné soustavy v každé fázi stejný, tak po vynásobení čísla tři dostaneme výkon celkový.



Obr. 28. Výpočet činného a zdánlivého výkonu v jednofázovém zapojení

Výpočet zdánlivého a činného výkonu v trojfázovém zapojení

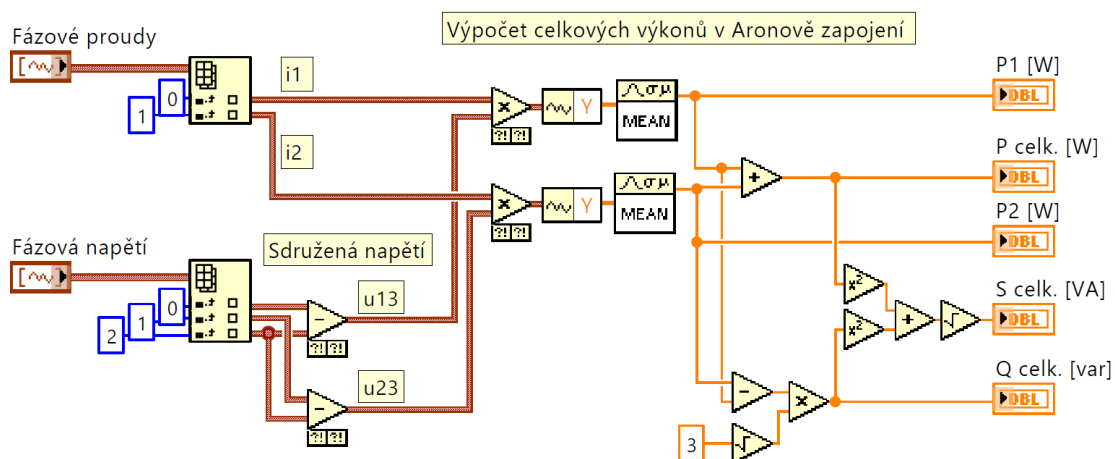
U trojfázového zapojení jsou k dispozici všechny proudy a všechna napětí. Zdánlivý výkon v každé fázi je dán součinem efektivních hodnot proudů a napětí. Činný výkon se vypočítá vynásobením okamžitých hodnot napětí a proudů a jejich střední hodnoty. Jalový výkon je pak dopočítán z již zkalibrovaných výkonů a to pomocí vzorce (9).



Obr. 29. Výpočet zdánlivého a činného výkonu v trojfázovém zapojení

Výpočet celkových výkonů v Aronově zapojení

Aronovo zapojení se používá tam, kde jsou k dispozici pouze dva proudy a tři napětí. Celkový činný výkon je dán součtem činných výkonů P1 a P2 daných vynásobením okamžitých hodnot sdružených napětí a fázových proudů a jejich středních hodnot. Celkový jalový výkon je dán rozdílem P2 a P1 a vynásobením třetí odmocninou. Celkový zdánlivý výkon je dán podle vzorce (9).



Obr. 30. Výpočet celkových výkonů v Aronově zapojení

5 Realizace kontroly běhu aplikace čtením status proměnné.

Pro realizaci kontroly běhu aplikace čtením status proměnné byla využita aplikace s názvem Data Dashboard. Ta uživatelům s operačními systémy iOS a Android umožňuje přístup k naměřeným hodnotám v LabVIEW například pomocí komunikačního rozhraní Wi-Fi. Lze pak dálkově odečíst aktuální měřený výkon a posoudit, zda wattmetr pracuje správně. Protože DEWE-561 nedisponuje Wi-Fi rozhraním, byl použit Wi-Fi USB adaptér TP-LINK TL-WN722N.

5.1 Data Dashboard for LabVIEW

Uživatelé mohou monitorovat a ovládat LabVIEW aplikace z tabletů s Androidem, stejně jako z tabletů se systémem iOS. Funkce ve verzi pro Android jsou naprosto stejné, jako u verze pro iOS. Vytvořené ovládací panely lze snadno používat v obou mobilních operačních systémech.

Podpora pro dvourozměrná pole hodnot, umožňuje vytvářet grafy s větším počtem průběhů. Lze tak v jednom prvku uživatelského rozhraní zobrazovat více datových sad, bez nutnosti vytvářet oddělený graf pro každou z nich.

Pro uživatele, kteří provozují stejnou aplikaci na větším počtu distribuovaných systémů (například několik systémů cRIO, na kterých běží stejná aplikace, a liší se pouze názvy), lze použít jeden ovládací panel a za běhu přepínat mezi jednotlivými systémy. Stačí nastavit IP adresy systémů a Data Dashboard se postará o automatické připojení prvků uživatelského rozhraní k příslušným proměnným při přepínání mezi systémy prostřednictvím výsuvné nabídky.

Obrázky a prvky uživatelského rozhraní umožňují nastavit úroveň průhlednosti, vývojáři tak mohou skládat obrázky přes sebe a vytvářet tak prvky uživatelského rozhraní na míru. [16]

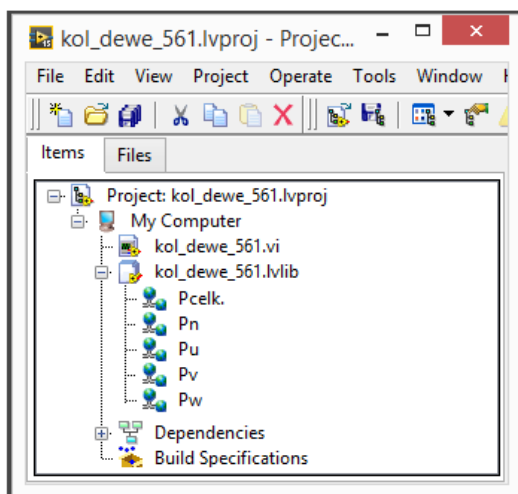


Obr. 31. Logo Data Dashboard for LabVIEW [17]

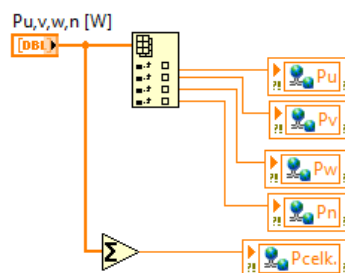
5.2 Tvorba aplikace

Pro vytvoření aplikace bylo potřeba si v projektu vytvořit sdílené proměnné a ty vložit do blokového diagramu. Následně se vkládáním indikátorů a textových popisků vytvoří grafické uživatelské rozhraní v aplikaci Data Dashboard. Spuštěním aplikace v LabVIEW dojde k nahrání sdílených proměnných na lokální síť, což umožní propojení s indikátory v tabletu. Postup propojení obou aplikací znázorňují obrázky 32, 33, 34.

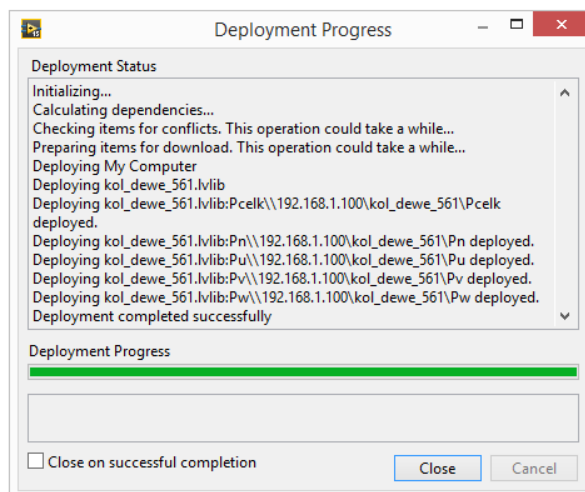
Projekt se sdílenými proměnnými pro činný výkon



Blokový diagram



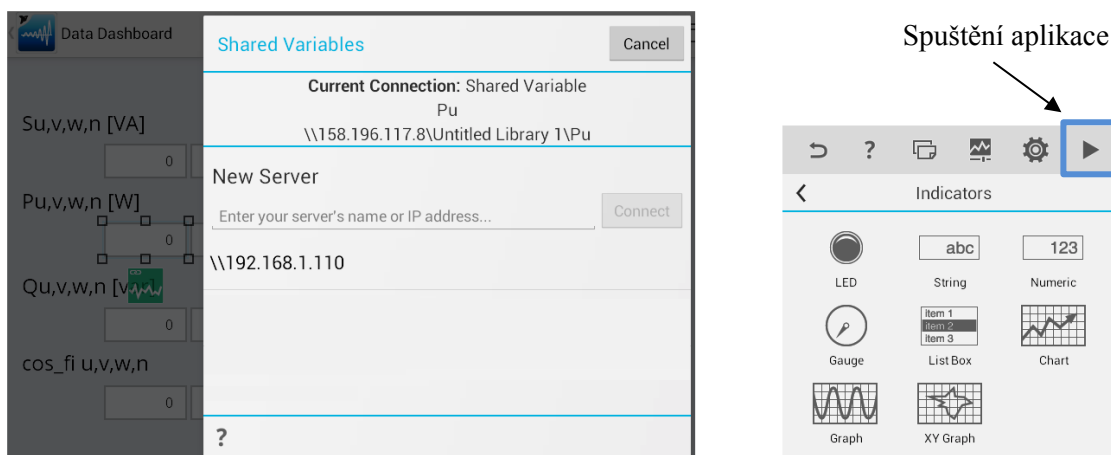
Obr. 32. Projekt se sdílenými proměnnými pro činný výkon a blokový diagram



Obr. 33. Připojení sdílených proměnných na lokální síť

Způsob propojení indikátoru se sdílenou proměnnou

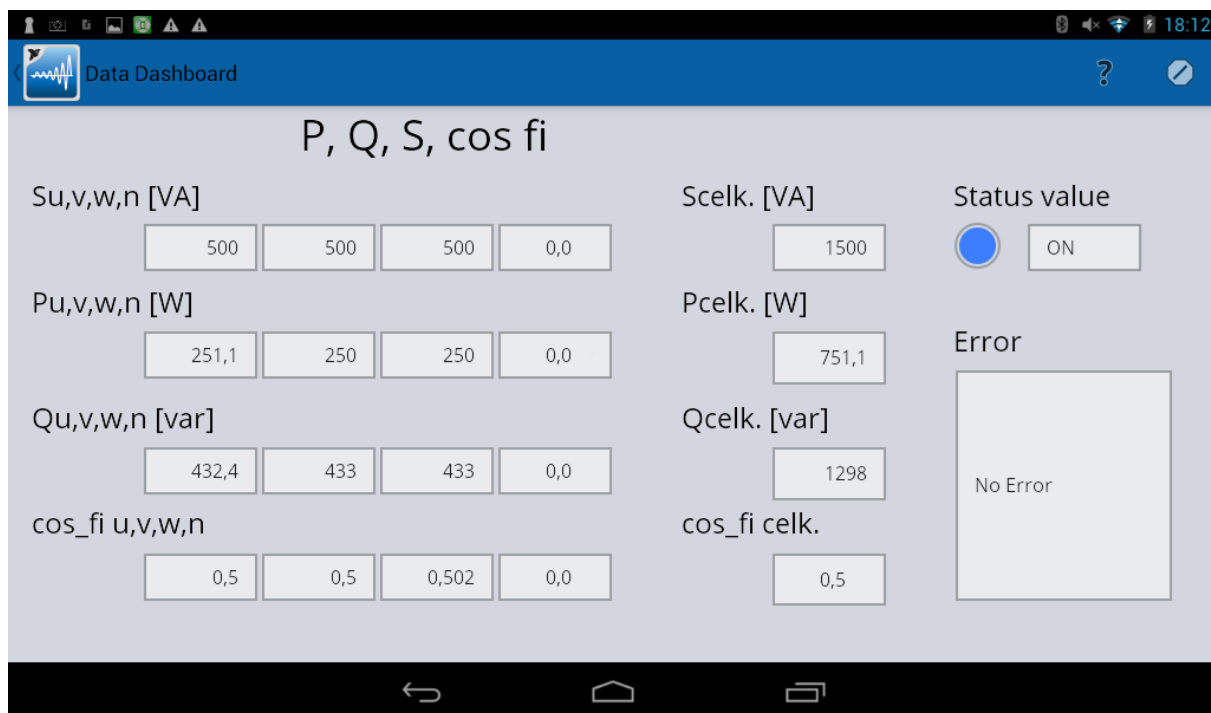
V aplikaci Data Dashboard se rozklikne indikátor, zvolí se „Shared Variables“ a lokální IP adresa počítače, na kterém byla spuštěna aplikace v LabVIEW. Tímto je indikátor s proměnnou propojen. Po spuštění aplikace zobrazují indikátory aktuální měřené hodnoty.



Obr. 34. Způsob propojení indikátoru se sdílenou proměnnou a nabídka indikátorů

Vytvořené uživatelské rozhraní

Vytvořené uživatelské rozhraní zobrazuje měřené výkony a účinník. Běh aplikace je znázorněn indikátorem „Status value“ a popiskem ON/OFF.



Obr. 35. Vytvořené uživatelské rozhraní

6 Kalibrace analyzátoru a implementace korekčních tabulek

Kalibrace byla provedena kalibrátorem OMICRON CMC 256plus. Byl použit pro generování třífázového napětí a proudu.

OMICRON CMC 256plus je testovací sada pro ochranu zařízení a univerzální kalibrátor. Vysoká přesnost umožňuje kalibraci široké škály měřicích přístrojů, včetně: elektroměrů třídy přesnosti 0.2, měřicích převodníků, přístrojů pro měření kvality elektrické energie a jednotek pro měření fázorů (PMU).

Přístroj nemá vlastní ovládací panel. Musí být připojen ethernetem k počítači se softwarem poskytovaným výrobcem s názvem Test Universe.



Obr. 36. OMICRON CMC 256plus [18]

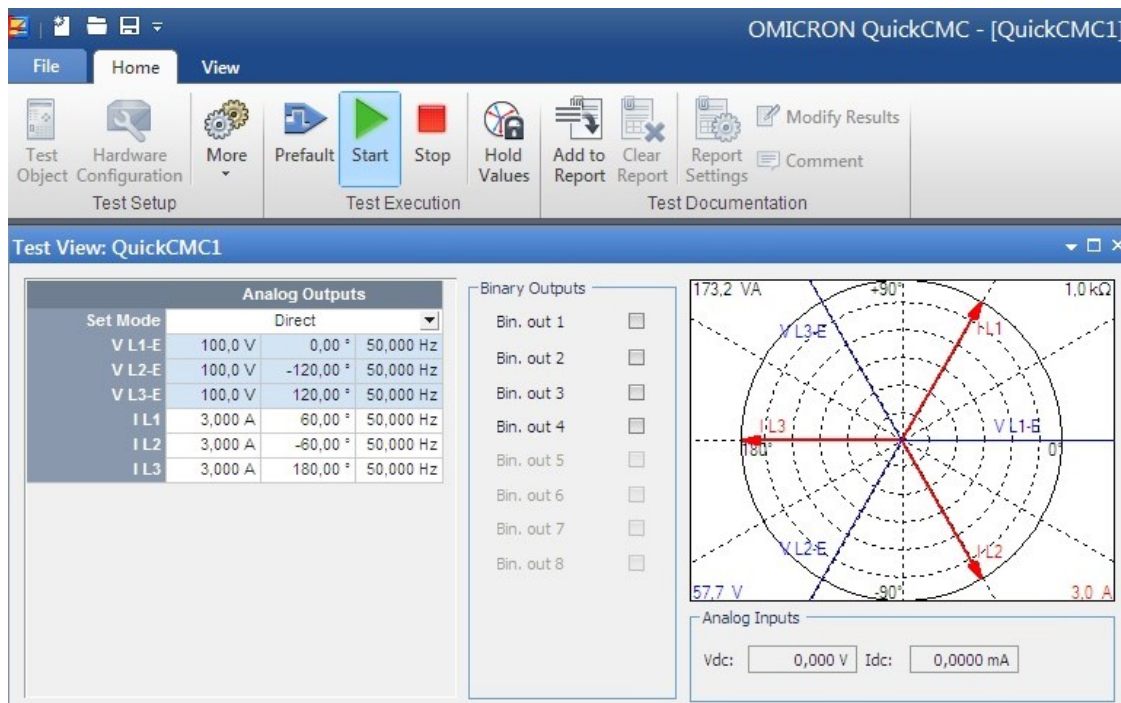
Parametry kalibrátoru OMICRON CMC 256plus

Tab. 6. Parametry kalibrátoru OMICRON CMC 256plus [19]

Napěťový výstup	4 x 300 V nebo 1 x 600 V AC
Proudový výstup	6 x 12,5 A nebo 3 x 25 A nebo 1 x 75 A
DC výstup	0 ... 264 V
Binární výstupy	4
DC měřicí vstupy	0 ... 10 V a 0 ... 20 mA
Multifunkční vstupy	10

Software kalibrátoru Omicron- Test Universe

Napětí bylo generováno 0 až 100 V s krokem 20 V. Proud 1 až 5 A s krokem 1 A. Fázový posun 0, 30 a 60°. Obr. 37. znázorňuje nastavení fázového posunu proudu před napětím o 60°.



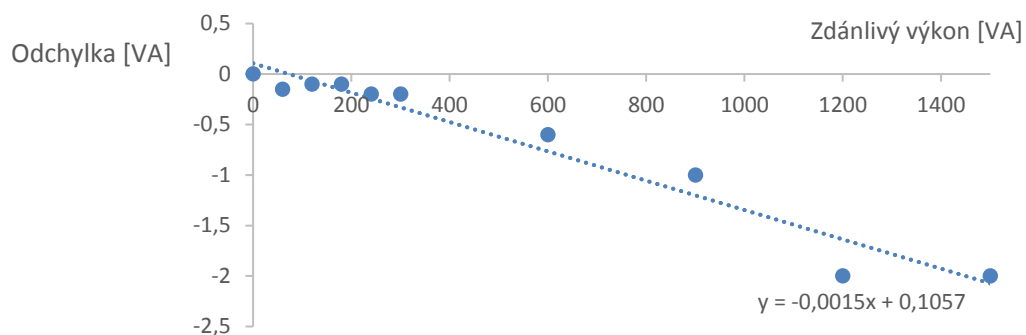
Obr. 37. Část obrazovky software kalibrátoru Omicron- Test Universe

Implementace kalibračních tabulek do programu

Vytvořená aplikace v LabVIEW pracuje s kalibračními soubory Calibrate_U_I.ini, Calibrate_1f.ini, Calibrate_Aron.ini a Calibrate_hvezda.ini. Jedná se o textové soubory, do kterých se zadají kalibrační hodnoty. Program pak s těmito daty pracuje a zpřesní měřené hodnoty.

Graf kalibračních hodnot (obr. 38.) zobrazuje odchylku zdánlivého výkonu DEWE-561 od hodnoty nastavených na kalibrátoru při různém nastavovaném zdánlivém výkonu. Při plném rozsahu, tzn. nastaveném napětí $U = 100 \text{ V}$ a proudu $I = 5 \text{ A}$ je zdánlivý výkon $S = 500 \text{ VA}$. DEWE-561 však zobrazoval hodnotu 498 VA. Cílem implementace kalibračních tabulek je co největší přiblížení ke skutečným hodnotám. Pokud vytvořená aplikace při zdánlivém výkonu $S = 500 \text{ VA}$ zobrazovala pouze hodnotu 498 VA, byl k této hodnotě přičten výkon 2 VA. Na tomto principu jsou všechny kalibrace v této aplikaci.

Graf kalibračních hodnot pro zdánlivý výkon v jednofázovém zapojení



Obr. 38. Graf kalibračních hodnot pro zdánlivý výkon v jednofázovém zapojení

Zdánlivý výkon před a po kalibraci

Tab. 7. Zdánlivý výkon před kalibrací

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]
1500	1502	-2
1200	1202	-2
900	901	-1
600	600,6	-0,6
300	300,2	-0,2
240	240,2	-0,2
180	180,1	-0,1
120	120,1	-0,1
60	60,15	-0,15
0	0	0

Tab. 8. Zdánlivý výkon po kalibraci

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]
1500	1500	0
1200	1200	0
900	899,7	0,3
600	599,7	0,3
300	299,8	0,2
240	239,9	0,1
180	180	0
120	120,1	-0,1
60	60,16	-0,16
0	0,13	-0,13

Naměřené hodnoty činného výkonu v trojfázovém zapojení před a po kalibraci

Tab. 9. Činný výkon před kalibrací

Pro posun 0°

P[W]	P dewe [W]			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
500	500,3	500,8	500,8	-0,3	-0,8	-0,8
400	400,4	400,8	400,6	-0,4	-0,8	-0,6
300	300,1	300,4	300,4	-0,1	-0,4	-0,4
200	200,0	200,2	200,2	0,0	-0,2	-0,2
100	99,98	100,1	100,1	0,0	-0,1	-0,1
80	79,99	80,07	80,06	0,0	-0,1	-0,1
60	59,98	60,06	60,06	0,0	-0,1	-0,1
40	39,98	40,05	40,03	0,0	0,0	0,0
20	19,99	20,03	20,01	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pro posun 30°

P[W]	P dewe [W]			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
433,0	425,4	426,2	424,5	7,6	6,8	8,5
346,4	340,1	340,8	339,4	6,3	5,6	7,0
259,8	254,9	255,5	254,4	4,9	4,3	5,4
173,2	169,8	170,2	169,4	3,4	3,0	3,8
86,60	84,75	85,00	84,57	1,8	1,6	2,0
69,28	67,79	68,00	67,67	1,5	1,3	1,6
51,96	50,85	51,01	50,76	1,1	1,0	1,2
34,64	33,89	34,01	33,84	0,8	0,6	0,8
17,32	16,94	17,01	16,91	0,4	0,3	0,4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pro posun 60°

P[W]	P dewe [W]			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
250	238,7	239,3	238,7	11,3	10,7	11,3
200	190,6	191,5	190,6	9,4	8,5	9,4
150	142,7	143,7	142,7	7,3	6,3	7,3
100	95,0	95,8	95,0	5,0	4,2	5,0
50	47,2	47,9	47,2	2,8	2,1	2,8
40	37,7	38,4	37,7	2,3	1,6	2,3
30	28,4	28,7	28,4	1,6	1,3	1,6
20	18,8	19,2	18,8	1,2	0,8	1,2
10	9,39	9,60	9,40	0,6	0,4	0,6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 10. Činný výkon po kalibraci

Pro posun 0°

P[W]	P dewe [W]			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
500	500,8	500,1	500,5	-0,8	-0,1	-0,5
400	400,7	400,0	400,3	-0,7	0,0	-0,3
300	300,5	300,0	300,2	-0,5	0,0	-0,2
200	200,3	199,9	200,1	-0,3	0,1	-0,1
100	100,1	99,94	100,0	-0,1	0,1	0,0
80	80,10	79,95	80,04	-0,1	0,0	0,0
60	60,08	59,97	60,04	-0,1	0,0	0,0
40	40,07	39,99	40,04	-0,1	0,0	0,0
20	20,06	20,01	20,05	-0,1	0,0	-0,1
0	0,05	-0,05	0,05	-0,1	0,1	-0,1

Pro posun 30°

P[W]	P dewe [W]			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
433,0	432,7	432,3	432,6	0,3	0,7	0,4
346,4	346,1	345,7	346,0	0,3	0,7	0,4
259,8	259,4	259,1	259,4	0,4	0,7	0,4
173,2	172,9	172,6	172,8	0,3	0,6	0,4
86,60	86,39	86,19	86,39	0,2	0,4	0,2
69,28	69,14	68,96	69,15	0,1	0,3	0,1
51,96	51,90	51,72	51,92	0,1	0,2	0,0
34,64	34,66	34,48	34,66	0,0	0,2	0,0
17,32	17,41	17,23	17,42	-0,1	0,1	-0,1
0,00	0,05	-0,05	0,05	-0,1	0,1	-0,1

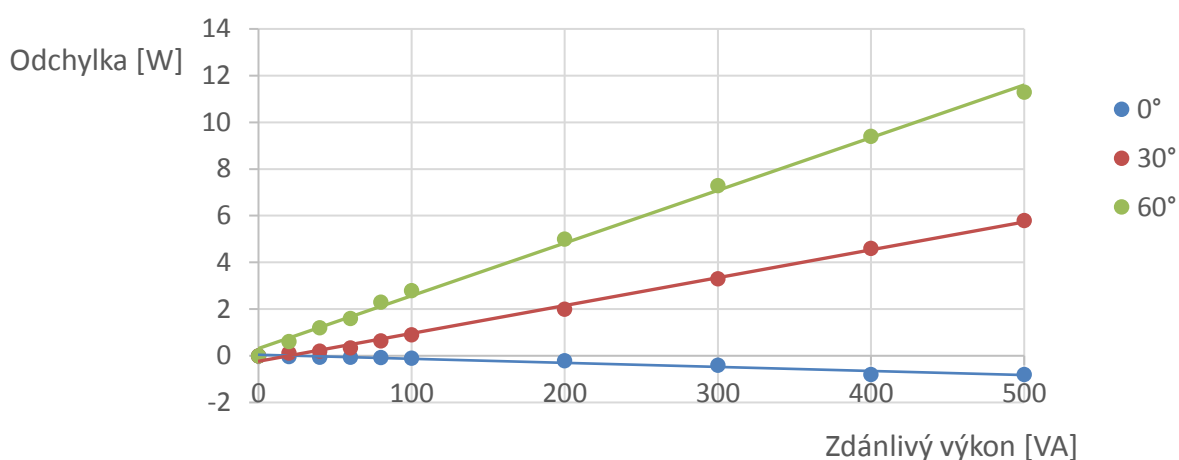
Pro posun 60°

P[W]	P dewe [W]			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
250	250,2	250,1	250,0	-0,2	-0,1	0,0
200	199,9	199,8	199,9	0,1	0,2	0,1
150	149,8	149,6	149,8	0,2	0,4	0,2
100	99,8	99,6	99,8	0,2	0,4	0,2
50	49,86	49,61	49,9	0,1	0,4	0,1
40	39,96	39,69	39,99	0,0	0,3	0,0
30	30,05	29,76	30,09	-0,1	0,2	-0,1
20	20,14	19,82	20,17	-0,1	0,2	-0,2
10	10,24	9,89	10,25	-0,2	0,1	-0,3
0	0,05	-0,05	0,05	-0,1	0,1	-0,1

Implementace kalibračních hodnot do programu

Z naměřených hodnot před kalibrací je vidět, že přesnost wattmetru klesá s fázovým posunem. Proto bylo třeba do algoritmu pro zpřesnění vložit fázový posun jako další proměnnou. Při fázovém posunu 60° se naměřené hodnoty činného výkonu v jedné fázi lišily, až o 11 W. Tuto chybu do měření vnášely proudové kleště, které vykazují chybu fázového posunu až 5° . Protože kalibrační křivka s fázovým posunem poměrně lineárně roste, tak při implementaci stačí pracovat pouze s hodnotami pro posun 60° . Pro posun 60° se tato křivka bude uplatňovat maximálně. Pro posun 30° , budou hodnoty poloviční a pro posun 0° se k hodnotám činného výkonu nebude přičítat hodnota žádná.

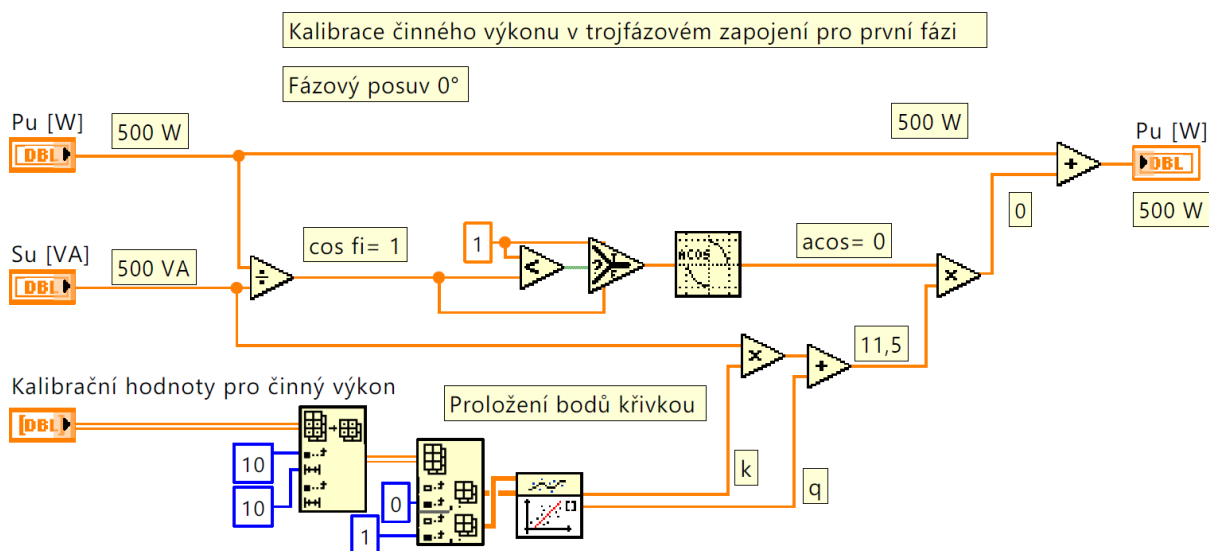
Kalibrační hodnoty pro činný výkon v trojfázovém zapojení



Obr. 39. Odchylka činného výkonu před kalibrací pro posun 0° , 30° , 60°

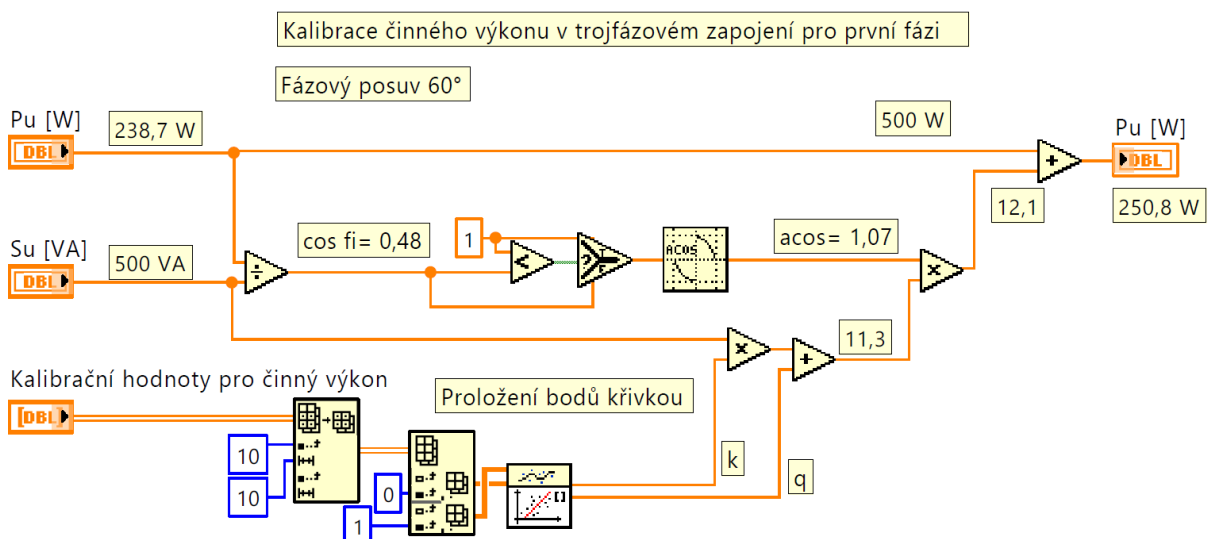
Implementace kalibračních hodnot do programu

Obrázek 40. popisuje princip implementace kalibračních hodnot pro první napěťovou fázi při fázovém posunu 0° . Podle kalibračních tabulek se k činnému výkonu nemá přičítat hodnota žádná, což zajistí násobení $\arccos=0$.



Obr. 40. Implementace kalibračních hodnot do programu pro posun 0°

Při nastaveném zdánlivém výkonu 500 VA a fázovém posunu 60° je hodnota činného výkonu 238,7 W. Což je o 11,3 W méně, než je skutečná hodnota. $\arccos=1,07$ zajistí, že se k činnému výkonu 238,7 W přičte hodnota z kalibračních tabulek. Zobrazovaný výkon je pak 250,8 W.



Obr. 41. Implementace kalibračních hodnot do programu pro posun 60°

7 Ověření analyzátoru při praktickém měření a vyhodnocení výsledků

Výsledky analyzátoru při praktickém měření ukazují tabulky 14, 15 a 16 a to ve všech zapojeních. Tabulky 11, 12 a 13 ukazují maximální absolutní chybu v daném zapojení.

Po zpřesnění wattmetru kalibračními tabulkami vykazoval wattmetr největší chybu při měření jalového výkonu v trojfázovém zapojení při fázovém posunu 30°. Zde vykazoval chybu 1% z celkového rozsahu. Třída přesnosti při měření činného výkonu byla stanovena na 0,5 % a při měření zdánlivého výkonu na 0,4 %.

Třída přesnosti:

$$\delta_{TP} = \frac{|\Delta_m|}{X_R} \cdot 100 [\%] \quad (17)$$

$|\Delta_m|$ Maximální absolutní chyba přístroje

X_R Největší hodnota měřicího rozsahu

δ_{TP} Třída přesnosti

Jednotlivé třídy přesnosti

Tab. 11. Jednofázové zapojení

	$ \Delta_m $	X_R	δ_{TP}
S celk. [VA]	0,3 VA	1500 VA	0,02 %
P celk. [W]	3,7 W	750 W	0,5 %
Q celk. [var]	3,04 var	1299 var	0,3 %

Tab. 12. Trojfázové zapojení

	$ \Delta_m $	X_R	δ_{TP}
S [VA]	1 VA	500 VA	0,2 %
P [W]	0,8 W	500 W	0,2 %
Q [var]	2,5 var	250 var	1 %

Tab. 13. Aronovo zapojení

	$ \Delta_m $	X_R	δ_{TP}
S celk. [VA]	5 VA	1500 VA	0,4 %
P celk. [W]	5 W	1500 W	0,4 %
Q celk. [var]	2,6 var	750 var	0,4 %

Tab. 14. Měření v jednofázovém zapojení po kalibraci

Pro posun 0°

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]	P celk. [W]	P celk. dewe	ΔP [W]	Q celk. [var]	Q celk. dewe	ΔQ [var]	cos φ	cos φ dewe	Δcos fi
1500	1500	0	1500	1501	-1	0	0	0	1	1	0
1200	1200	0	1200	1201	-1	0	0	0	1	1	0
900	899,7	0,3	900	900,4	-0,4	0	0	0	1	1	0
600	599,7	0,3	600	600,1	-0,1	0	0	0	1	1	0
300	299,8	0,2	300	299,9	0,1	0	0	0	1	1	0
240	239,9	0,1	240	239,9	0,1	0	0	0	1	1	0
180	180	0	180	180	0	0	0	0	1	1	0
120	120,1	-0,1	120	120,1	-0,1	0	0	0	1	1	0
60	60,16	-0,16	60	60,14	-0,14	0	0	0	1	1	0
0	0,13	-0,13	0	0,35	-0,35	0	0	0	1	1	0

Pro posun 30°

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]	P celk. [W]	P celk. dewe	ΔP [W]	Q celk. [var]	Q celk. dewe	ΔQ [var]	cos φ	cos φ dewe	Δcos fi
1500	1500	0	1299	1299	0	750	748,9	1,10	0,866	0,866	0
1200	1200	0	1039	1039	0	600	599,6	0,40	0,866	0,866	0
900	899,7	0,3	779,4	778,9	0,5	450	450,3	-0,30	0,866	0,866	0
600	599,7	0,3	519,6	518,9	0,7	300	300,6	-0,60	0,866	0,865	0,001
300	299,8	0,2	259,8	259,3	0,5	150	150,5	-0,50	0,866	0,865	0,001
240	239,9	0,1	207,8	207,5	0,3	120	120,3	-0,30	0,866	0,865	0,001
180	180	0	155,9	155,7	0,2	90	90,17	-0,17	0,866	0,865	0,001
120	120	0	103,9	104	-0,1	60	60	0,00	0,866	0,866	0
60	60,16	-0,16	52	52,19	-0,2	30	29,92	0,08	0,866	0,868	0
0	0,133	-0,13	0	0,82	-0,82	0	0	0,00	0,866	0,866	0

Pro posun 60°

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]	P celk. [W]	P celk. dewe	ΔP [W]	Q celk. [var]	Q celk. dewe	ΔQ [var]	cos φ	cos φ dewe	Δcos fi
1500	1500	0	750	753,7	-3,7	1299	1296	3,04	0,5	0,502	-0,002
1200	1200	0	600	602,6	-2,6	1039	1037	2,23	0,5	0,502	-0,002
900	899,7	0,3	450	451,4	-1,4	779,4	778,3	1,12	0,5	0,502	-0,002
600	599,7	0,3	300	300,5	-0,5	519,6	519	0,62	0,5	0,501	-0,001
300	299,8	0,2	150	150,1	-0,1	259,8	259,5	0,31	0,5	0,501	-0,001
240	239,9	0,1	120	120,3	-0,3	207,8	207,5	0,35	0,5	0,501	-0,001
180	180	0	90	90,43	-0,43	155,9	155,6	0,28	0,5	0,502	-0,002
120	120	0	60	60,55	-0,55	103,9	103,6	0,32	0,5	0,502	-0,002
60	60,15	-0,15	30	30,68	-0,68	52	51,74	0,22	0,5	0,51	0
0	0,13	0,13	0	0,91	-0,91	0	0	0,00	0,5	0,51	0

Tab. 15. Měření v trojfázovém zapojení po kalibraci

Pro posun 0°

S [VA]	S dewe			ΔS [VA]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
500	501,0	499,6	500,4	-1,0	0,4	-0,4
400	400,7	399,7	400,2	-0,7	0,3	-0,2
300	300,5	299,7	300,2	-0,5	0,3	-0,2
200	200,3	198,8	200,1	-0,3	1,2	-0,1
100	100,1	99,9	100,0	-0,1	0,1	0,0
80	80,1	79,9	80,0	-0,1	0,1	0,0
60	60,1	59,9	60,0	-0,1	0,1	0,0
40	40,1	40,0	40,0	-0,1	0,0	0,0
20	20,1	20,0	20,1	-0,1	0,0	-0,1
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

P [W]	P dewe			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
500	500,8	500,1	500,5	-0,8	-0,1	-0,5
400	400,7	400,0	400,3	-0,7	0,0	-0,3
300	300,5	300,0	300,2	-0,5	0,0	-0,2
200	200,3	199,9	200,1	-0,3	0,1	-0,1
100	100,1	99,9	100,0	-0,1	0,1	0,0
80	80,1	80,0	80,0	-0,1	0,0	0,0
60	60,1	60,0	60,0	-0,1	0,0	0,0
40	40,1	40,0	40,0	-0,1	0,0	0,0
20	20,1	20,0	20,1	-0,1	0,0	-0,1
0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,0

Q [var]	Q dewe			ΔQ [var]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

cos ϕ	cos ϕ dewe			$\Delta \cos \phi$		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0

Pro posun 30°

S [VA]	S dewe			ΔS [VA]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
500	501,0	499,6	500,8	-1,0	0,4	-0,8
400	400,8	399,6	400,6	-0,8	0,4	-0,6
300	300,6	299,7	300,4	-0,6	0,3	-0,4
200	200,3	199,8	200,2	-0,3	0,2	-0,2
100	100,1	99,9	100,1	-0,1	0,2	-0,1
80	80,1	79,9	80,1	-0,1	0,1	-0,1
60	60,1	59,9	60,1	-0,1	0,1	-0,1
40	40,1	40,0	40,1	-0,1	0,0	-0,1
20	20,1	20,0	20,1	-0,1	0,0	-0,1
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

P [W]	P dewe			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
433	432,7	432,3	432,6	0,3	0,7	0,4
346	346,1	345,7	346,0	0,3	0,7	0,4
260	259,4	259,1	259,4	0,4	0,7	0,4
173	172,9	172,6	172,8	0,3	0,6	0,4
87	86,4	86,2	86,4	0,2	0,4	0,2
69	59,1	69,0	69,2	10,1	0,3	0,1
52	51,9	51,7	51,9	0,1	0,2	0,0
35	34,7	34,5	34,7	0,0	0,2	0,0
17	17,4	17,2	17,4	-0,1	0,1	-0,1
0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,0

Q [var]	Q dewe			ΔQ [var]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
250	252,5	250,4	252,2	-2,5	-0,4	-2,2
200	202,2	200,5	201,9	-2,2	-0,5	-1,9
150	151,8	150,5	151,5	-1,8	-0,5	-1,5
100	101,3	100,5	101,1	-1,3	-0,5	-1,1
50	50,7	50,4	50,5	-0,7	-0,4	-0,5
40	40,5	40,4	40,4	-0,5	-0,4	-0,4
30	30,3	30,3	30,3	-0,3	-0,3	-0,2
20	20,2	20,2	20,1	-0,2	-0,2	-0,1
10	10,0	10,2	10,0	0,0	-0,2	0,0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

cos ϕ	cos ϕ dewe			$\Delta \cos \phi$		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
0,87	0,86	0,87	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,87	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,87	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,86	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,86	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,86	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,86	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,86	0,86	0	0	0
0,87	0,86	0,86	0,87	0	0	0
0,87	0,87	0,86	0,87	0	0	0
0,87	0,87	0,87	0,87	0	0	0

Pro posun 60°

S [VA]	S dewe			ΔS [VA]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
500	501,0	499,6	500,4	-1,0	0,4	-0,4
400	400,7	399,6	400,5	-0,7	0,4	-0,5
300	300,5	299,7	300,4	-0,5	0,3	-0,4
200	200,3	199,7	200,2	-0,3	0,3	-0,2
100	100,1	99,9	100,1	-0,1	0,2	-0,1
80	80,1	79,9	80,1	-0,1	0,1	-0,1
60	60,1	59,9	60,1	-0,1	0,1	-0,1
40	40,1	40,0	40,1	-0,1	0,0	-0,1
20	20,1	20,0	20,1	-0,1	0,0	-0,1
0	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0

P [W]	P dewe			ΔP [W]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
250	250,2	250,1	250,0	-0,2	-0,1	0,0
200	199,9	199,8	199,9	0,1	0,2	0,1
150	149,8	149,6	149,8	0,2	0,4	0,2
100	99,8	99,6	99,8	0,2	0,4	0,2
50	49,9	49,6	49,9	0,1	0,4	0,1
40	40,0	39,7	40,0	0,0	0,3	0,0
30	30,1	29,8	30,1	-0,1	0,2	-0,1
20	20,1	19,8	20,2	-0,1	0,2	-0,2
10	10,2	9,9	10,3	-0,2	0,1	-0,3
0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,0

Q [var]	Q dewe			ΔQ [var]		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
433,0	434,0	432,6	433,4	-1,0	0,4	-0,4
346,4	347,2	346,1	347,1	-0,8	0,3	-0,7
259,8	260,5	259,6	260,3	-0,7	0,2	-0,5
173,2	173,7	173,2	173,6	-0,5	0,0	-0,4
86,6	86,8	86,7	86,8	-0,2	-0,1	-0,1
69,3	69,4	69,3	69,4	-0,1	-0,1	-0,1
52,0	52,1	52,0	52,0	-0,1	-0,1	0,0
34,6	34,7	34,7	34,6	0,0	-0,1	0,0
17,3	17,3	17,4	17,3	0,0	-0,1	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

cos ϕ	cos ϕ dewe			$\Delta \cos \phi$		
	u	v	w	Δu	Δv	Δw
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0
0,5	0,51	0,50	0,51	0	0	0
0,5	0,50	0,50	0,50	0	0	0

Tab. 16. Měření v Aronově zapojení po kalibraci

Pro posun 0°

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]	P celk. [W]	P celk. dewe	ΔP [W]	Q celk. [var]	Q celk. dewe	ΔQ [var]	cos φ	cos φ dewe	Δcos fi
1500	1505	-5	1500	1505	-5	0	0,76	-0,76	1	1	0
1200	1204	-4	1200	1204	-4	0	1,45	-1,45	1	1	0
900	902,7	-2,7	900	902,8	-2,8	0	2,1	-2,1	1	1	0
600	601,6	-1,6	600	601,8	-1,8	0	2,3	-2,3	1	1	0
300	300,7	-0,7	300	300,8	-0,8	0	2	-2	1	1	0
240	240,6	-0,6	240	240,6	-0,6	0	1,84	-1,84	1	1	0
180	180,5	-0,5	180	180,5	-0,5	0	1,58	-1,58	1	1	0
120	120,3	-0,3	120	120,4	-0,4	0	1,3	-1,3	1	1	0
60	60,16	-0,16	60	60,16	-0,16	0	1,05	-1,05	1	1	0
0	0,02	-0,02	0	0,34	-0,34	0	0,2	-0,2	1	1	0

Pro posun 30°

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]	P celk. [W]	P celk. dewe	ΔP [W]	Q celk. [var]	Q celk. dewe	ΔQ [var]	cos φ	cos φ dewe	Δcos fi
1500	1500	0	1299	1301	-2	750	751,8	-1,8	0,866	0,868	-0,002
1200	1200	0	1039	1040	-0,77	600	602,2	-2,2	0,866	0,867	-0,001
900	899,6	0,4	779,4	779,9	-0,5	450	452,6	-2,6	0,866	0,867	-0,001
600	599,7	0,3	519,6	519,6	0	300	302,5	-2,5	0,866	0,867	-0,001
300	299,8	0,2	259,8	259,7	0,1	150	152,1	-2,1	0,866	0,866	0
240	239,9	0,1	207,8	207,8	0,05	120	121,8	-1,8	0,866	0,865	0,001
180	179,9	0,1	155,9	156	-0,12	90	91,54	-1,54	0,866	0,867	-0,001
120	120	0	103,9	104,1	-0,18	60	61,26	-1,26	0,866	0,868	-0,002
60	59,98	0,02	52	52,26	-0,3	30	30,96	-0,96	0,866	0,871	0
0	0,02	-0,02	0	0,35	-0,35	0	0,21	-0,21	0,866	0,866	0

Pro posun 60°

S celk. [VA]	S celk. dewe	ΔS [VA]	P celk. [W]	P celk. dewe	ΔP [W]	Q celk. [var]	Q celk. dewe	ΔQ [var]	cos φ	cos φ dewe	Δcos fi
1500	1498	2	750	752,9	-2,9	1299	1302	-2,96	0,5	0,502	-0,002
1200	1199	1	600	601,7	-1,7	1039	1042	-2,77	0,5	0,502	-0,002
900	899	1	450	450,8	-0,8	779,4	781,8	-2,38	0,5	0,501	-0,001
600	599,3	0,7	300	300,2	-0,2	519,6	521,6	-1,98	0,5	0,501	-0,001
300	299,6	0,4	150	150	0	259,8	261,3	-1,49	0,5	0,5	0
240	239,7	0,3	120	120,1	-0,1	207,8	209,1	-1,25	0,5	0,501	-0,001
180	179,8	0,2	90	90,29	-0,29	155,9	156,9	-1,02	0,5	0,502	-0,002
120	119,9	0,1	60	60,45	-0,45	103,9	104,8	-0,88	0,5	0,504	-0,004
60	59,97	0,03	30	30,61	-0,61	52	52,59	-0,63	0,5	0,51	0
0	0,02	-0,02	0	0,38	-0,38	0	0,2	-0,2	0,5	0,5	0

8 Závěr

Výsledkem této práce je aplikace analyzátoru pro určení zdánlivého, činného, jalového výkonu a účinníku v třífázové napájecí soustavě. Před začátkem měření se v okně konfigurace specifikují měřicí rozsahy, typ zapojení a další nezbytné parametry. Analyzátor měří výkony ve třech různých zapojeních:

- Jednofázové zapojení, pro souměrné soustavy, kde stačí jeden proud a jedno napětí.
- Trojfázové zapojení, pro nesouměrné soustavy, kde jsou k dispozici všechny napětí a proudy.
- Aronovo zapojení, kde jsou k dispozici všechna napětí a pouze dva proudy.

Pro kontrolu běhu aplikace wattmetru byla využita aplikace pro operační systémy Android a iOS s názvem Data Dashboard. Ta uživatelům umožňuje jednorázový přístup a kontrolu naměřených hodnot v LabVIEW aplikacích například prostřednictvím Wi-Fi rozhraní.

Kalibrace byla provedena pro tyto parametry:

- Napětí 0, 20, 40, 60, 80, 100 V.
- Proud 1, 2, 3, 4, 5 A.
- Fázový posun 0, 30 a 60°.

Protože přesnost analyzátoru při zvyšujícím se posunu klesala, byl implementován algoritmus pro jeho zpřesnění. Chybu do měření vnášely proudové kleště, které vykazují chybu fázového posunu až 5°.

Po zpřesnění wattmetru kalibračními tabulkami vykazoval wattmetr největší chybu při měření jalového výkonu v trojfázovém zapojení při fázovém posunu 30°. Zde vykazoval chybu 1% z celkového rozsahu. Třída přesnosti při měření činného výkonu byla stanovena na 0,5 % a při měření zdánlivého výkonu na 0,4%.

Naučil jsem se pracovat samostatně a řešit rozsáhlejší problém. Práce mi poskytla náhled do problematiky analyzátorů sítí a rozšířil jsem si znalosti v programování. Navrhnutý wattmetr by mohl být přesnější, pokud by se eliminovala chyba proudových kleští. To znamená, že by bylo vhodnější nejprve zkalibrovat proudové kleště a až následně měřené výkony.

Literatura

- [1] KOVAL, Ludvík. *Elektrická měření - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 147 s.
- [2] *Základní pojmy obvodové elektroniky* [online]. Praha, 1998 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap1/10.html>
- [3] FIALA, Miroslav, Václav VRÁNA a Ctirad KOUDELKA. *TROJFÁZOVÉ OBVODY* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/3FAZ-FAST.pdf>
- [4] KOLÁŘ, Václav, Miroslav FIALA a Václav VRÁNA. *TROJFÁZOVÉ OBVODY* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_trojfaz_obvody_bc.pdf
- [5] DEWETRON. *DEWE-561 Technical Reference Manual*. Graz-Grambach Austria:DEWETRON Elektronische Messgeraete Ges.m.b.H, 2010. Dostupné z: <https://ccc.dewetron.com/dl/537461cf-942c-4e40-8c79-47acd9c49862>
- [6] DEWETRON. *Power Network Analysis. DEWE - PNA*. Graz-Grambach Austria:DEWETRON Elektronische Messgeraete Ges.m.b.H. Dostupné z: http://www.dewesolutions.sg/uploads/7/7/1/6/7716986/dewetron-apps_power_pna_b090318e.pdf
- [7] DEWE-561. In: *DEWETRON* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://ccc.dewetron.com/pg/dewe-561>
- [8] Current clamps for AC current. In: *Chauvin-arnoux* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00SAL14_49.PDF
- [9] Line Socket Hirschmann. In: *Jaycar electronics* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.jaycar.com.au/line-socket-hirschmann-c16-1-6-pole-pe/p/PS1001>
- [10] NI PCI-6250. In: *National Instruments* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/14122>
- [11] High-Speed M Series Multifunction Data Acquisition. *National Instruments* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-22>

[12] A/D převodník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk

[13] BILÍK, Petr. *Virtuální instrumentace 2 - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 288 s.

[14] SÚKUPOVÁ, Lucie. *Vzorkování signálu a aliasing* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/vzorkovani-signalu-a-aliasing/>

[15] BILÍK, Petr. *Systémy pro měření a sběr dat - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 303 s.

[16] *Data Dashboard pro LabVIEW* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://ce.almanachprodukce.cz/produkty/opis/0/370/data_dashboard_pro_labview

[17] Data Dashboard for LabVIEW. *Google Play* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ni.labview.SharedVariableViewer>

[18] CMC 256plus. *OMICRON* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.omicronenergy.com/en/products/all/secondary-testing-calibration/cmc-256plus/>

[19] CMC 256plus. *OMICRON* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CMC-256plus-Brochure-ENU.pdf

Seznam příloh

Příloha č. 1	Aplikace pro měření výkonů v LabVIEW	příloha na CD
Příloha č. 2	Aplikace v Data Dashboard	příloha na CD
Příloha č. 3	Manuál pro komunikaci s DEWE-561	příloha na CD